Universität für Bodenkultur Wien
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt
Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft

LV-Nr. 815 306

Applied Soil Physics

LV-Nr. 815 313

Physical and Selected Chemical Methods of Soil Analysis

Lecturers: P. Cepuder, G. Kammerer, R. Nolz, S. Strohmeier

Only for internal use at
University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna SS 12

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS 2

1. BESTIMMUNG DES WASSERGEHALTS 4

1.1 Massenwassergehalt (engl. „gravimetric water content“) w 4
1.1.1 Laborbestimmung durch Ofentrocknung 4
1.1.2 Carbidmethode 5

1.2 Wasseranteil (engl. „volumetric water content“) θ 8
1.2.1 Ofentrocknung von ungestört entnommenen Stechzylinderproben 8
1.2.2 Indirekte Ermittlung aus dem Massenwassergehalt und der Trockendichte 9

2. FESTSTOFFDICHTE, TROCKENDICHTE UND PORENANTEIL 10

2.1 Feststoffdichte (engl. „particle density“) ρ_s 10

2.2 Trockendichte (engl. „bulk density“) ρ_d 14

2.3 Porenanteil (engl. „total porosity“) n_P 15

3. KORNGRÖSSENANALYSE 17

3.1 Methodik 17

3.2 Verfahrensauswahl 18

3.3 Trockensiebung Grobboden 19

3.4 Probenvorbereitung für die Feinbodenanalyse 22
3.4.1 Vorbereitung einer lufttrockenen Bodenprobe (nur bei Grobbodenanteil < 10 %) 22
3.4.2 Ansetzen der Proben für die Feinsiebung und für das Absetzverfahren 23

3.5 Nasssiebung des Feinbodens 24
3.5.1 Auswertung 24

3.6 Pipettierverfahren nach Kubiena 28

4. BESTIMMUNG DER MATRIXPOTENZIAL-WASSERANTEIL-BEZIEHUNG IM LABOR 34

4.1 Kapillarimeter nach Fischer für den niederen Bereich 34

4.2 Druckplattenapparat für höhere Wasserspannungen 39

5. BESTIMMUNG DER WASSERDURCHLÄSSIGKEIT 41

5.1 k-Wert-Bestimmung im Labor – Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel 41

5.2 k-Wert-Bestimmung im Feld – Doppelring-Infiltrometer 43

5.2.1 Instationärversuch 44
5.2.2 Stationärversuch 48
5.3 Guelph-Permeameter 50
6. AGGREGATSTABILITÄT 65
7. BESTIMMUNG VON CARBONAT 66
8. BESTIMMUNG DES PH-WERTS 73
9. BESTIMMUNG DER ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT 74
10. HUMUSBESTIMMUNG DURCH NASSOXIDATION 75
11. GEHALT AN VERSCHIEDENEN N-FORMEN 78
11.1 Bestimmung des Gehalts an mineralisiertem Stickstoff 78
11.2 Bestimmung des Ammoniumgehalts als Indophenol 82
11.3 Bestimmung des Gehalts an Gesamtstickstoff 83
11.4 Bestimmung des Nitratgehalts nach Navonne 85
12. ANHANG 87
12.1 Viskosität von Wasser 87
12.2 Dichte von Wasser 89
12.3 Zur Umrechnung von Einheiten 90
12.3.1 Druckeinheiten Torr und Pascal 90
12.3.2 Temperatureinheiten Kelvin und Grad Celsius 93
12.4 Erläuterungen zur Korngrößenanalyse 95
12.4.1 Zerkleinerung von Aggregaten 95
12.4.2 Dispergiermittelmasse in der Pipette 95
LITERATURVERZEICHNIS 98

1. BESTIMMUNG DES WASSERGEHALTS

1.1 Massenwassergehalt (engl. „gravimetric water content“) *w*

Der Massenwassergehalt *w* wird nach ÖNORM L 1062 [1988] bestimmt. Im Gegensatz zum Wasseranteil kann *w* auch anhand gestörter Bodenproben ermittelt werden, weil das Bodenvolumen nicht benötigt wird. Der Massenwassergehalt *w* ist definiert durch die Beziehung

$$w = \frac{m_w}{m_s}. \tag{1-1}$$

$[w]$ = $g \cdot g^{-1}$ Massenwassergehalt der Bodenprobe
$[m_w]$ = g Wassermasse der Bodenprobe
$[m_s]$ = g Feststoffmasse der Bodenprobe

1.1.1 Laborbestimmung durch Ofentrocknung

Zur Verdampfung des Bodenwassers wird im Labor ausschließlich der Trockenschrank verwendet.

Geräte

- Abdampfschale
- Waage; Genauigkeit ±0,01 g
- Trockenschrank
- Wärmeisolierung zwischen Abdampfschale und Waagenteller
  oder Exsikkator und Vakuumpumpe

Durchführung

a) 50 g bis 100 g (bei skelettarmen Böden genügen auch (10–20) g) feuchte, vor Verdunstung geschützte Bodenprobe in eine trockene Abdampfschale mit bekannter Masse m_{Sch} geben
b) ehebaldigst auf 0,01 g genau wägen ($m_{Sch+s+w}$)
c) Trocknung bis zur Massenkonstanz (etwa 15 Stunden lang) im Trockenschrank bei 105 °C
d) Abdampfschale mit der trockenen Bodenprobe entweder sofort (innerhalb von 5 Minuten) wärmeisoliert wägen (Wärmeisolation zwischen Abdampfschale und Waagenteller!) oder im evakuierten Exsikkator (um eine Wasserdampfaufnahme aus der Luft zu vermeiden) auskühlen lassen, mit gleicher Genauigkeit zurückwägen (m_{Sch+s})

Auswertung

Die verdunstete Wassermasse m_w ergibt sich aus der Differenz zwischen der Masse der Abdampfschale mit der feuchten und der ofengetrockneten Bodenprobe: $m_w = m_{Sch+s+w} - m_{Sch+s}$. Die Feststoffmasse m_s entspricht der Differenz zwischen der Masse der Abdampfschale mit der ofentrockenen Bodenprobe und der Masse der Abdampfschale: $m_s = m_{Sch+s} - m_{Sch}$. Daraus folgt die Formel

$$w = \frac{m_{Sch+s+w} - m_{Sch+s}}{m_{Sch+s} - m_{Sch}}.$$

$[w]$ = g·g^{-1} Massenwassergehalt der Bodenprobe
$[m_{Sch}]$ = g Masse der Abdampfschale
$[m_{Sch+s+w}]$ = g Masse der Abdampfschale mit der feuchten Bodenprobe
$[m_{Sch+s}]$ = g Masse der Abdampfschale mit der ofentrockenen Bodenprobe

1.1.2 Carbidmethode

Mit der Carbidmethode kann man den Massenwassergehalt des Bodens oder anderer Prüfgüter im Feld bestimmen. Bei dieser Methode reagiert beigefügtes Calciumcarbid mit dem Wasser im Prüfgut unter Entstehung von Gas, das je nach dem Massenwassergehalt einen mehr oder weniger großen Anstieg des Gasdrucks im Druckgefäß bewirkt.
Chemisch ist dieser Prozess eine Hydrolyse von Calciumacetylid (Calciumcarbid, CaC_2) unter Entstehung von Acetylen (Ethin, C_2H_2) [Mortimer und Müller, 2003]:

$$CaC_2\,(s) + 2\,H_2O \rightarrow Ca^{2+}\,(aq) + 2\,OH^-\,(aq) + C_2H_2\,(g)$$

Für die Versuchsdurchführung wird das sogenannte C-M-Gerät verwendet, das sich samt der sonstigen Ausrüstung in einem handlichen Holzkoffer befindet.

Ausrüstung

- Schachtel mit Calciumcarbid-Ampullen
- Holzkoffer; Inhalt:
- Handwaage und Aufhängbügel
- Spachtel und Löffel
- Druckgefäß samt Verschluss mit Manometer
- Behälter mit drei Stahlkugeln
- Flaschenbürste und Reinigungstuch

Probenentnahme

Man entnimmt nach den allgemeinen Regeln der Probenentnahme entsprechende Durchschnittsproben von dem Prüfgut und zerkleinert gegebenenfalls die Probe in der Reibschale. Bodenproben müssen nicht zerkleinert werden.
Zum Wägen wird die beigefügte Handwaage aufgestellt, indem man den Aufhängebügel in die Eckhalterung des Kastens einsetzt und daran die Waage aufhängt. Bei Arbeiten im Freien wird der Aufhängebügel in die Aussparung in der Auflage für den Flaschenhals im Kasten eingesetzt. Der aufgestellte Kastendeckel dient dann als Windschutz für die Waage.
Die Probemenge, die man mit der beigefügten Spachtel oder dem Löffel entnehmen kann, richtet sich nach dem vermutlichen Massenwassergehalt.

Tabelle 1-1: Einwaage in das Druckgefäß

vermutlicher Massenwassergehalt	w / %	5	10	20	30
notwendige Einwaage	m_{s+w} / g	20	10	5	3

Durchführung

Die abgewogene Probemenge mit der Masse m_{s+w} wird zweckmäßig auf ein Stück gefaltetes glattes

Papier gebracht und ohne Verlust in das Druckgefäß geschüttet. Dann werden unter leichter Neigung des Gerätes 2 bis 4 Stahlkugeln eingebracht. Hierauf lässt man in der gleichen Weise eine Ampulle Calciumcarbid vorsichtig in den Flaschenhals gleiten und verschließt das C-M-Gerät mit dem Manometer gasdicht. Die vorstehenden Arbeitsgänge sind zur Vermeidung von Verdunstungsverlusten schnell hintereinander abzuwickeln.
Durch mehrmaliges kräftiges Schütteln wird die Glasampulle zertrümmert, was am Steigen der Manometeranzeige erkennbar ist. Die Prüfsubstanz wird mit dem Calciumcarbid durch kreisende Bewegung mit der Stahlflasche gut vermischt. Es stellt sich in wenigen Minuten ein konstanter Manometerdruck ein. Dieser Enddruck wird abgelesen. Den Massenwassergehalt in Prozent liest man in der untenstehenden Tabelle neben dem Manometerdruck in der Spalte der genommenen Einwaage ab.
Beträgt die Manometeranzeige weniger als 0,2 bar, muss die Bestimmung zur Kontrolle mit der nächstgrößeren Einwaage wiederholt werden. Wird mehr als 1,5 bar angezeigt, arbeitet man mit einer kleineren Einwaage.

Nach Beendigung der Untersuchung öffnet man langsam – zunächst auf einer Seite – den Verschluss und lässt das Acetylen-Luftgemisch entweichen (Rauchen und offenes Feuer sind hierbei zu vermeiden). Dann schüttet man den Inhalt aus, entsorgt getrennt die Prüfgut- und Ampullenreste fachgerecht (Vorsicht beim Ausschütten! – Ätzkalk, Glasssplitter). Die Stahlkugeln sind mit dem trockenen Staubtuch zu reinigen. Das Gerät ist dann sofort für die nächste Bestimmung einsatzbereit.

Tabelle 1-2: Massenwassergehalt in der Bodenprobe in Abhängigkeit von der Einwaage und vom Druck im Gefäß

Manometer-Enddruck p / bar	Einwaage m_{s+w} / g: 20	15	10	5	3
	Massenwassergehalt w / %				
0,10	0,5	0,6	0,9	1,8	3,0
0,15	0,7	0,9	1,4	2,8	4,7
0,20	0,9	1,3	1,9	3,8	6,3
0,25	1,2	1,6	2,4	4,8	8,0
0,30	1,5	1,9	2,9	5,8	9,7
0,35	1,7	2,3	3,4	6,8	11,3
0,40	2,0	2,6	3,9	7,8	13,0
0,45	2,2	2,9	4,4	8,8	14,7
0,50	2,5	3,3	4,9	9,8	16,3
0,55	2,7	3,6	5,4	10,8	18,0
0,60	3,0	3,9	5,9	11,8	19,7
0,65	3,2	4,3	6,4	12,8	21,3
0,70	3,5	4,6	6,9	13,8	23,0
0,75	3,7	4,9	7,4	14,8	24,7
0,80	4,0	5,3	7,9	15,8	26,3
0,85	4,2	5,6	8,4	16,8	28,0
0,90	4,5	5,9	8,9	17,8	29,7
0,95	4,7	6,3	9,4	18,8	31,4
1,00	5,0	6,6	10,0	19,9	33,1
1,05	5,2	7,0	10,5	20,9	34,8
1,10	5,5	7,3	11,0	21,9	36,5
1,15	5,7	7,6	11,5	22,9	38,2
1,20	6,0	8,0	12,0	23,9	39,9
1,25	6,2	8,3	12,5	24,9	41,6
1,30	6,5	8,7	13,0	26,0	43,3
1,35	6,8	9,0	13,5	27,0	45,0
1,40	7,0	9,3	14,0	28,0	46,7
1,45	7,2	9,7	14,5	29,0	48,3
1,50	7,5	10,0	15,0	30,0	50,0

1.2 Wasseranteil (engl. „volumetric water content“) θ

Im Gegensatz zum Massenwassergehalt w ist für den Wasseranteil θ das Gesamtvolumen der Bodenprobe erforderlich. θ wird im Regelfall mit ungestörten Stechzylinderproben bestimmt. Eine Alternative ist bei bindigen Böden die sogenannte Klumpenmethode (engl. „*clod method*“). Bei nichtbindigen Böden ist die Entnahme einer ungestörten Stechzylinder-Probe oft nicht möglich, sodass ein *Volumenersatzverfahren* herangezogen werden muss.

Der Wasseranteil ist definiert durch $$\boxed{n_w = \theta = \frac{V_w}{V}}. \qquad (1\text{-}2)$$

$[n_w]$ = $cm^3 \cdot cm^{-3}$ Wasseranteil in der Bodenprobe; Anteil der wässrigen Phase
$[V_w]$ = cm^3 Wasservolumen in der Bodenprobe
$[V]$ = cm^3 Gesamtvolumen der Bodenprobe (Stechzylinder)

1.2.1 Ofentrocknung von ungestört entnommenen Stechzylinderproben

Bei der Verwendung von *Madera-Probenziehern* sind die Proben nach der Entnahme mit bekanntem Volumen noch vor Ort in wasserdichte Säckchen umzufüllen, die sofort (< 5 Min.) luftdicht zu verschließen bzw. zu verknoten sind.

Geräte

- Stechzylinder mit bekanntem Volumen V_{St} (bei den 5 cm hohen Zylindern beträgt V_{St} ziemlich genau 200,0 cm^3)
- Metalluntersetzer oder Abdampfschale
- Waage; Genauigkeit ±0,01 g
- Trockenschrank
- Exsikkator
- Vakuumpumpe

Durchführung

a) Stechzylinderprobe mit bekanntem Volumen V_{St} im Feld entnehmen und sofort luftdicht mit Deckeln verschließen
b) entweder noch im Feld mit einer transportablen Waage oder am nächsten Tag im Labor die erste Wägung (mit Deckeln) durchführen ($m_{D+St+s+w}$)
c) im Labor die beiden Deckel von der Probe abnehmen, trocken wischen (an der Innenseite der Deckel bildet sich oft Kondenswasser) und wägen (m_D)
d) Metalluntersetzer oder Abdampfschale wägen (m_U), Bodenprobe daraufsetzen, ebenfalls wägen ($m_{U+St+s+w}$) und bei 105 °C bis zur Massenkonstanz im Trockenschrank trocknen (mindestens einen Tag lang)
e) Kontrolle der Massenkonstanz durch mindestens zweimaliges Wägen mit mindestens 6 Stunden Zeitdifferenz. Hierfür einen Metalluntersetzer verkehrt auf die Waage legen (zur thermischen Entkoppelung der heißen Bodenprobe vom Waagenteller) und tarieren. Handschuhe anziehen und Bodenprobe mitsamt Untersetzer oder Schale rasch (um Wasserdampfaufnahme aus der

Luft zu vermeiden) wägen (m_{U+St+s}). Massenkonstanz ist erreicht, wenn die Massenabnahme zwischen zwei Wägungen weniger als 0,20 g beträgt.

Auswertung

Aus der Differenz der Masse der feuchten Probe zur Masse der trockenen Probe ergibt sich die Masse des verdunsteten Wassers $m_w = m_{D+St+s+w} - m_D + m_U - m_{U+St+s}$. Dieser Wert dividiert durch die Dichte des Wassers ρ_w ergibt das Volumen des Wassers V_w. Bezogen auf das Volumen der Bodenprobe (Stechzylindervolumen V_{St}) lässt sich der Wasseranteil in cm^3/cm^3 ermitteln, bzw. durch die Multiplikation mit 100 in Prozent.

$$n_w = \theta = \frac{V_w}{V} = \frac{m_{D+St+s+w} - m_D + m_U - m_{U+St+s}}{\rho_w \cdot V_{St}}$$

$[m_{D+St+s+w}] = g$	Masse des Stechzylinders samt 2 Deckeln und feuchter Bodenprobe
$[m_D] = g$	Masse der beiden trocken gewischten Deckel
$[m_U] = g$	Masse des Metalluntersetzers oder der Abdampfschale
$[m_{U+St+s+w}] = g$	Masse des Stechzylinders mit der feuchten Bodenprobe samt Untersetzer
$[m_{U+St+s}] = g$	Masse des Stechzylinders mit der ofentrockenen Bodenprobe samt Untersetzer
$[\rho_w] = g \cdot cm^{-3}$	Dichte des Wassers; im Bereich 0 °C < t < 32 °C kann die Dichte konstant mit $\rho_w = 1{,}00\ g \cdot cm^{-3}$ gesetzt werden. Der Fehler bleibt hierbei unter 0,5 %. Für einen genaueren Wert von ρ_w siehe Tabelle 12-4.
$[V_{St}] = cm^3$	Volumen des Stechzylinders (= Gesamtvolumen der Bodenprobe: $V_{St} = V$)

1.2.2 Indirekte Ermittlung aus dem Massenwassergehalt und der Trockendichte

Mit der Kenntnis oder der Abschätzung der Trockendichte kann man den Wasseranteil θ aus dem Massenwassergehalt w ermitteln. Dazu benutzen wir vorerst die Bestimmungsformel der Dichte von

Wasser $$\rho_w = \frac{m_w}{V_w},$$

um die Wassermasse auszudrücken durch $m_w = V_w \cdot \rho_w$. (1-3)

Nachdem weiters $w = m_w / m_s$ (Formel 1-1) und $\rho_d = m_s / V$ (Formel 2-9) gilt, ist

$$m_s = \frac{m_w}{w} = \rho_d \cdot V.$$

In dieser Gleichung ersetzen wir die Wassermasse durch die rechte Seite der Gl. 1-3 und erhalten

$$\frac{V_w \cdot \rho_w}{w} = \rho_d \cdot V.$$

Die Division der Gleichung durch V und durch ρ_w ergibt schließlich

$$\frac{V_w}{V} = \boxed{\theta = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w}}.$$

2. FESTSTOFFDICHTE, TROCKENDICHTE UND PORENANTEIL

2.1 Feststoffdichte (engl. „particle density“) ρ_s

Die Bestimmung erfolgt nach ÖNORM L 1068 [1988] mit luftgetrocknetem Feinboden, dessen Massenwassergehalt w entweder bekannt ist oder separat gemessen werden muss. Die Feststoffdichte ist durch folgende Formel definiert:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \tag{2-1}$$

$[\rho_s]$ = g·cm^{-3} Feststoffdichte der Bodenprobe
$[m_s]$ = g Feststoffmasse der Bodenprobe
$[V_s]$ = cm^3 Feststoffvolumen der Bodenprobe

Geräte

- Pyknometer mit 50 ml Volumen und zugehörigem Glasstoppel
- Waage; Genauigkeit mindestens ±1 mg
- entlüftetes Leitungswasser
- Bunsenbrenner
- Exsikkator
- Vakuumpumpe
- Thermometer; Genauigkeit mindestens ±0,1 °C

Durchführung

a) leeres, trockenes Pyknometer mit dem Volumen V_P = 50,00 mL mitsamt dem dazugehörigen Glasstoppel wägen (m_P) und die Pyknometer-Nummer (Nr.) notieren
b) Pyknometer zu etwa einem Drittel mit luftgetrocknetem Feinboden (Korndurchmesser < 2 mm) füllen und nochmals (mitsamt dem Stoppel!) wägen (m_{P+s+w})
c) Pyknometer mit entlüftetem Wasser bis gut zur Hälfte füllen und über einem Bunsenbrenner erwärmen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass beim Aufkochen keine Boden-Wasser-Suspension herausspritzt. Vorgang so lange fortsetzen, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen
d) Pyknometer mit entlüftetem Wasser auffüllen und in einen Exsikkator stellen. Mit einer Vakuumpumpe Unterdruck anlegen und weiter entlüften, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen
e) Pyknometer aus dem Exsikkator nehmen und mit dem Glasstoppel verschließen. Darauf achten, dass unterhalb des Stoppels keine Luftblasen verbleiben und die Kapillare im Stoppel vollständig gefüllt ist. Pyknometer außen (ohne zu reiben) abtrocknen und wägen ($m_{P+s+w+W}$)
f) Wassertemperatur t im Pyknometer auf 0,1 °C genau feststellen

Auswertung

Neben den drei Gewichten bzw. Massen m_P, m_{P+s+w} und $m_{P+s+w+W}$ benötigt man noch den Massenwassergehalt w der lufttrockenen Bodenprobe; das Volumen des Pyknometers V_P und die abgelesene Wassertemperatur t im Pyknometer. Mit der Temperatur t kann die Dichte des Wassers $\rho_w(t)$ ($g \cdot cm^{-3}$) entweder aus der Formel 12-2 (siehe Kapitel 12.2 im Anhang) berechnet oder aus der Tabelle 12-4 entnommen werden:

$$\rho_w(t) = a_5 \cdot \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 \cdot (t + a_2)}{a_3 \cdot (t + a_4)}\right] \qquad 0\,°C \le t \le 40\,°C$$

$[\rho_w(t)]$	$= g \cdot cm^{-3}$	Dichte von reinem, luftfreiem Wasser in der Isotopenzusammensetzung von SMOW bei $p_0 = 101325$ Pa	
$[t]$	$= °C$	gemessene Temperatur des Wassers im Pyknometer	
$[a_1]$	$= °C$	Koeffizient;	$a_1/°C = -3{,}983035$
$[a_2]$	$= °C$	Anpassungskoeffizient;	$a_2/°C = 301{,}797$
$[a_3]$	$= °C^2$	Anpassungskoeffizient;	$a_3/°C^2 = 522528{,}9$
$[a_4]$	$= °C$	Anpassungskoeffizient;	$a_4/°C = 69{,}34881$
$[a_5]$	$= g \cdot cm^{-3}$	Koeffizient;	$a_5/(g \cdot cm^{-3}) = 0{,}999974950$.

Die Berechnung der Feststoffdichte erfolgt am einfachsten mit der Formel 2-8 (zur Herleitung der Formel siehe das folgende Kapitel „Theorie“)

$$\rho_s = \frac{m_{P+s+w} - m_P}{V_P \cdot (1 + w) - \dfrac{m_{P+s+w+W} \cdot (1 + w) - m_{P+s+w} - w \cdot m_P}{\rho_w(t)}}.$$

$[\rho_s]$	$= g \cdot cm^{-3}$	Feststoffdichte der Bodenprobe
$[m_{P+s+w}]$	$= g$	Masse des Pyknometers mitsamt der lufttrockenen Bodeneinwaage und Stoppel
$[m_P]$	$= g$	Masse des leeren Pyknometers (mitsamt dem Glasstoppel!)
$[V_P]$	$= cm^3$	Volumen des Pyknometers je nach Größtkorn der Bodenprobe; für Feinboden wird im Allgemeinen ein Pyknometer mit dem Volumen $V_P = 50\,cm^3$ verwendet. Das genaue Volumen des jeweiligen Pyknometers mit der Nummer Nr. ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.
$[w]$	$= g \cdot g^{-1}$	Massenwassergehalt, separat bestimmt
$[m_{P+s+w+W}]$	$= g$	Masse des mit Wasser aufgefüllten Pyknometers
$[\rho_w(t)]$	$= g \cdot cm^{-3}$	Dichte von Wasser im Pyknometer bei gemessener Temperatur t in °C

Theorie

Zuerst soll die Feststoffmasse der lufttrockenen Bodeneinwaage bestimmt werden. Bezeichnet man die Masse des Pyknometers mit m_P und die des Pyknometers mitsamt der Bodenprobe mit dem Massenwassergehalt w mit m_{P+s+w}, erhält man die Masse der Einwaage m_{s+w} aus

$$m_{s+w} = m_{P+s+w} - m_P.$$

$[m_{P+s+w}]$	$= g$	Masse des Pyknometers mitsamt der lufttrockenen Bodeneinwaage
$[m_P]$	$= g$	Masse des Pyknometers
$[m_{s+w}]$	$= g$	Masse der lufttrockenen Bodeneinwaage

Da der Massenwassergehalt nach Formel 1-1 $w = m_w/m_s$ beträgt, folgt für die in der Bodenprobe enthaltene Wassermasse $m_w = w \cdot m_s$ und $m_{s+w} = m_s + m_w = m_s + w \cdot m_s = m_s \cdot (1 + w)$, woraus sich

$$\boxed{m_s = \frac{m_{s+w}}{1+w}} \tag{2-2}$$

$[m_s]$ = g Feststoffmasse der lufttrockenen Bodeneinwaage
$[w]$ = $g \cdot g^{-1}$ Massenwassergehalt, separat bestimmt

bzw. $$m_s = \frac{m_{P+s+w} - m_P}{1+w}$$ ergibt. (2-3)

Umgekehrt kann die Wassermasse m_w in der lufttrockenen Bodenprobe sofort angegeben werden mit $$m_w = w \cdot m_s = m_{s+w} \cdot \frac{w}{1+w} = (m_{P+s+w} - m_P) \cdot \frac{w}{1+w}.$$ (2-4)

$[m_w]$ = g Wassermasse der lufttrockenen Bodeneinwaage

Aus der Dichte des Wassers $\rho_w(t)$ bei gegebener Temperatur t im Pyknometer laut Formel 12-2 oder Tabelle 12-4 und ihrer Definitionsgleichung $\rho_w(t) = \frac{m_w}{V_w}$ lässt sich das vom Bodenwasser eingenommene Volumen mit

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w(t)} = \frac{(m_{P+s+w} - m_P) \cdot w}{\rho_w(t) \cdot (1+w)} \tag{2-5}$$

$[V_w]$ = cm^3 Volumen des Bodenwassers (der lufttrockenen Bodenprobe) ($1\ cm^3 \equiv 1$ mL)
$[\rho_w(t)]$ = $g \cdot cm^{-3}$ Dichte von Wasser bei gegebener Temperatur t

berechnen. Bezeichnet man die Masse des mit Wasser aufgefüllten Pyknometers mit $m_{P+s+w+W}$, beträgt die aufgefüllte Wassermasse $m_W = m_{P+s+w+W} - m_{P+s+w}$

$[m_{P+s+w+W}]$ = g Masse des mit Wasser aufgefüllten Pyknometers
$[m_W]$ = g aufgefüllte Wassermasse

und ihr Volumen $$V_W = \frac{m_W}{\rho_w(t)} = \frac{m_{P+s+w+W} - m_{P+s+w}}{\rho_w(t)}.$$ (2-6)

$[V_W]$ = cm^3 Volumen der aufgefüllten Wassermasse im Pyknometer ($1\ cm^3 \equiv 1$ mL)

Um das gesuchte Feststoffvolumen V_s zu erhalten, muss man V_w gemäß Gl. 2-5 und V_W gemäß Gl. 2-6 vom Pyknometervolumen V_P abziehen:

$$V_s = V_P - V_w - V_W = V_P - \frac{(m_{P+s+w} - m_P) \cdot w}{\rho_w(t) \cdot (1+w)} - \frac{m_{P+s+w+W} - m_{P+s+w}}{\rho_w(t)}.$$ (2-7)

$[V_s]$ = cm^3 Feststoffvolumen bzw. Volumen der ofentrockenen Bodenmasse im Pyknometer
$[V_P]$ = cm^3 Volumen des Pyknometers je nach Größtkorn der Bodenprobe; für Feinboden wird im Allgemeinen ein Pyknometer mit dem Volumen $V_P = 50\ cm^3$ verwendet.

Schließlich gelangt man mit den Ausdrücken für m_s (Gl. 2-3) und V_s (Gl. 2-7) und der Definitionsgleichung 2-1 zu einer Formel für die Feststoffdichte ρ_s

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{\frac{m_{P+s+w} - m_P}{1+w}}{V_P - \frac{(m_{P+s+w} - m_P) \cdot w}{\rho_w(t) \cdot (1+w)} - \frac{m_{P+s+w+W} - m_{P+s+w}}{\rho_w(t)}},$$

die in eine numerisch einfachere Form umgewandelt werden kann:

$$\rho_s = \frac{m_{P+s+w} - m_P}{V_P \cdot (1+w) - \frac{m_{P+s+w+W} \cdot (1+w) - m_{P+s+w} - w \cdot m_P}{\rho_w(t)}}. \tag{2-8}$$

Anmerkung

Die Feststoffdichte ρ_s ließe sich theoretisch auch von ungestörten aufgesättigten Bodenproben aus

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} = \frac{m_s}{V - V_w} = \frac{m_s}{V - \frac{m_w}{\rho_w(t)}} = \frac{m_s}{V - \frac{m_{St+s+w} - m_{St+s}}{\rho_w(t)}}$$

bestimmen, doch ist eine vollständige Aufsättigung einer ungestörten Bodenprobe schwierig zu erzielen (insbesondere die richtige Einstellung der Wasseroberfläche an der Probenoberseite), sodass die Wassermasse bzw. das Wasservolumen nicht genau mit dem Porenvolumen übereinstimmt und das Feststoffvolumen aus $V_s = V - V_w$ nur unzureichend genau ermittelt werden kann. ρ_s wird daher mit dem Pyknometer bzw. mit gestörten, zerkleinerten Bodenproben bestimmt.

2.2 Trockendichte (engl. „bulk density“) ρ_d

Für die Bestimmung der Trockendichte ist das Volumen der Gesamtprobe erforderlich, das bei der Stechzylinderprobe durch das Volumen des Stechzylinders und bei der Klumpenmethode durch die Tauchwägung bestimmt wird. Bei Böden mit Grundgefüge (Partikel sind nicht aggregiert) bzw. nichtbindigen Böden ist die Entnahme einer ungestörten Bodenprobe oft nicht möglich, sodass nur das Bodenersatzverfahren in Frage kommt. Bei diesem wird das Gesamtvolumen durch Auslitern der Entnahmegrube ermittelt.

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \tag{2-9}$$

$[\rho_d]$ = g·cm^{-3} Trockendichte der (ofentrockenen) Bodenprobe (Stechzylinder)
$[m_s]$ = g Feststoffmasse der ofentrockenen Bodenprobe
$[V]$ = cm^3 Gesamtvolumen der Bodenprobe bzw. des Stechzylinders

Geräte

- Stechzylinder mit der Nummer Nr.; die ungestörte Bodenprobe beinhaltend
- Waage; Genauigkeit mindestens ±0,01 g
- Metalluntersetzer oder Abdampfschale
- Exsikkator
- Vakuumpumpe

Durchführung

a) Stechzylinder im Labor auswählen, Nummer notieren (Nr.), wägen (m_{St}) und sein Volumen V_{St} (Standardzylinder: $V_{St} \approx 200\,\text{cm}^3$) aus den im Labor aufliegenden Tabellen entnehmen. Ungestörte Bodenprobe im Feld entnehmen.
b) einen Metalluntersetzer oder eine Abdampfschale wägen (m_U), Stechzylinderprobe aufsetzen und im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Massenkonstanz trocknen (mindestens einen Tag).
c) Kontrolle der Massenkonstanz durch mindestens zweimaliges Wägen mit mindestens 6 Stunden Zeitdifferenz. Hierfür einen Metalluntersetzer verkehrt auf die Waage legen (zur thermischen Entkoppelung der heißen Bodenprobe vom Waagenteller) und tarieren. Handschuhe anziehen und Bodenprobe mitsamt Untersetzer oder Schale rasch (um Wasserdampfaufnahme aus der Luft zu vermeiden) wägen (m_{U+St+s}). Massenkonstanz ist erreicht, wenn die Massenabnahme zwischen zwei Wägungen weniger als 0,20 g beträgt.

Auswertung

Die Feststoffmasse des Bodens m_S ergibt sich durch Abzug der Masse von Abdampfschale und Stechzylinder

$$\rho_d = \frac{m_{U+St+s} - m_U - m_{St}}{V_{St}}.$$

$[m_{U+St+s}]$ = g Masse des Untersetzers oder der Abdampfschale mit Stechzylinder und ofentrockener Bodenprobe

$[m_U]$ = g Masse des Untersetzers oder der Abdampfschale
$[m_{St}]$ = g Masse des Stechzylinders
$[V_{St}]$ = cm^3 Volumen des Stechzylinders
$[\rho_d]$ = $g \cdot cm^{-3}$ Trockendichte der (ofentrockenen) Bodenprobe (Stechzylinder)

Anmerkungen

Für die Trockendichte wird mitunter auch der Begriff der *Lagerungsdichte* verwendet. Die Lagerungsdichte wurde jedoch vor allem in der älteren Literatur (insbesondere im DVWK-Heft 115 [1980]) anders – und zwar als dimensionslose! Größe – definiert (dieselbige wird im DVWK-Heft 129 [1995] als *effektive Lagerungsdichte* bezeichnet) und sollte daher nicht zur Kennzeichnung der Trockendichte benutzt werden, um Missverständnisse zu vermeiden.

2.3 Porenanteil (engl. „total porosity") n_P

Der Porenanteil einer Bodenprobe ist definiert durch das Volumenverhältnis

$$n_p = \frac{V_P}{V} . \tag{2-10}$$

$[n_p]$ = $cm^3 \cdot cm^{-3}$ Porenanteil
$[V_p]$ = cm^3 Porenvolumen der Bodenprobe (teils mit Bodenwasser, teils mit Luft gefüllt)
$[V]$ = cm^3 Gesamtvolumen der Bodenprobe

Seine Bestimmung erfolgt indirekt über die Feststoffdichte ρ_s und die Trockendichte ρ_d in der Form

$$\boxed{n_p = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}} . \tag{2-11}$$

$[n_p]$ = $cm^3 \cdot cm^{-3}$ Porenanteil der Bodenprobe
$[\rho_d]$ = $g \cdot cm^{-3}$ Trockendichte der Bodenprobe
$[\rho_s]$ = $g \cdot cm^{-3}$ Feststoffdichte der Bodenprobe

Der Porenanteil n_p wird oft in Prozent angegeben $\left(\frac{n_P}{\%} = n_P \times 100\right)$, seltener als reine Verhältnisgröße mit der Dimension und Einheit 1.

Herleitung

Es gilt $V_p = V - V_s$
und nebstbei auch $V_p = V_w + V_a$.

$[V]$ = cm^3 Gesamtvolumen der Bodenprobe
$[V_s]$ = cm^3 Feststoffvolumen der Bodenprobe
$[V_w]$ = cm^3 Wasservolumen der Bodenprobe; jenes Teilvolumen des Porenvolumens, das vom Bodenwasser eingenommen wird
$[V_a]$ = cm^3 Luftvolumen der Bodenprobe; jenes Teilvolumen des Porenvolumens, das von der Bodenluft als kohärente Phase eingenommen wird

Aus den Definitionsgleichungen für die Trockendichte (Gl. 2-9) $\rho_d = m_s / V$ und für die Feststoffdichte (Gl. 2-1) $\rho_s = m_s / V_s$ folgt für das Gesamtvolumen $V = m_s / \rho_d$ und für das Feststoffvolumen $V_s = m_s / \rho_s$. Das Einsetzen dieser Ausdrücke für V und V_s in die Definitionsgleichung für den Poren-

anteil n_p (Gl. 2-10) liefert

$$n_p = \frac{V_P}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \frac{\frac{m_s}{\rho_d} - \frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_s}{\rho_d}} = \frac{\frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d \cdot \rho_s}}{\frac{1}{\rho_d}} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}.$$

Anmerkung

Die Anmerkung für die Feststoffdichte ρ_s gilt auch für den Porenanteil n_p. Eine direkte Bestimmung von n_p wäre z. B. durch Lufttrocknung, CO_2-Spülung im Exsikkator, Wägung, Aufsättigung im Exsikkator und erneute Wägung oder mit einem Luftpyknometer durchzuführen.

3. KORNGRÖSSENANALYSE

Die Bestimmung erfolgt in Anlehnung an die ÖNORMEN L 1061–1 [2002] und L 1061–2 [2002]. Die Analyse dient der Bestimmung der Massenanteile des Grobbodens und der Feinboden-Körnungsgruppen (Korngrößenklasse) Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) von Mineralböden. Als ***Feinboden*** wird der Siebdurchgang < 2 mm bezeichnet, der Rückstand als *Grobboden* oder Bodenskelett.

Tabelle 3-1: Beurteilung des Grobbodenanteiles (geschätzt) nach ÖNORM L 1050 [1994]

Bezeichnung	geschätzter Anteil des Bodenskelettvolumens am Bodengesamtvolumen in %
geringer Grobanteil	1 bis inkl. 10
mäßiger Grobanteil	über 10 bis inkl. 20
hoher Grobanteil	über 20 bis inkl. 40
sehr hoher Grobanteil	über 40 bis inkl. 70
vorwiegender Grobanteil	über 70

Tabelle 3-2: Korngrößenklassen des Grobbodens nach ÖNORM L 1050 [1994]

Bezeichnung	Kurzzeichen	Bezeichnung	Kurzzeichen	Bereich des Äquivalentdurchmessers
Blöcke		Bl		$d \geq 200$ mm
Körner abgerundet		Körner eckig-kantig		
Schotter	St	Steine	St	200 mm > $d \geq$ 63 mm
Kies	Ki	Grus	Gr	63 mm > $d \geq$ 2,0 mm

Tabelle 3-3: Korngrößenklassen des Feinbodens nach ÖNORM L 1050 [1994]

Bezeichnung	Kurzzeichen	Bereich des Äquivalentdurchmessers
Sand	S	2 mm > $d \geq$ 0,063 mm
Grobsand	gS	2 mm > $d \geq$ 0,63 mm
Mittelsand	mS	0,63 mm > $d \geq$ 0,2 mm
Feinsand	fS	0,2 mm > $d \geq$ 0,063 mm
Schluff	U	0,063 mm > $d \geq$ 0,002 mm
Grobschluff	gU	0,063 mm > $d \geq$ 0,02 mm
Mittelschluff	mU	0,02 mm > $d \geq$ 0,0063 mm
Feinschluff	fU	0,0063 mm > $d \geq$ 0,002 mm
Ton	T	0,002 mm > d

3.1 Methodik

Für die Trennung der Fraktionen stehen prinzipiell drei Methoden zur Verfügung. Der Grobboden wird grundsätzlich durch eine *Trockensiebung* in einzelne Korngrößenfraktionen aufgeteilt. Der Sandanteil des Feinbodens wird durch eine *Nasssiebung* abgetrennt und eventuell in Unterklassen aufgeteilt. Die Massenanteile an Schluff und Ton werden durch das *Pipettierverfahren* nach Kubiena bestimmt. Welche der Methoden zur Anwendung gelangen, hängt von der Bodenprobe und vom Zweck der Untersuchung ab.

Tabelle 3-4: Überblick über die Verfahren zur Trennung verschiedener Kornfraktionen

Korngrößenklasse	Fraktion	Verfahren
$d \geq 2$ mm	Grobboden	Trockensiebung Grobboden
2 mm > $d \geq$ 0,063 mm	Sand	Nasssiebung Feinboden
0,063 mm > d	Schluff und Ton	Pipettierverfahren nach Kubiena

Organische Substanz

Die im Folgenden beschriebene Methode ist bis zu einem Massenanteil an organischer Substanz unter 5 % ohne Vorbehandlung mit H_2O_2, bei einem Massenanteil zwischen 5 % und 15 % mit Vorbehandlung mit H_2O_2 anwendbar. Bei Proben mit einem Massenanteil an organischer Substanz über 15 % ist diese Methode nicht mehr anwendbar. Bei der Probenvorbereitung erkennbare organische Grobteile sind zu entfernen.

3.2 Verfahrensauswahl

Die Masse der vor Ort zu entnehmenden bzw. der für die komplette Korngrößenverteilung erforderlichen Urprobe richtet sich insbesondere nach dem Größtkorn.

Wenn der geschätzte Anteil des Grobbodens 10 % übersteigt, wird der Grobboden durch eine Trockensiebung in Korngrößenklassen getrennt. Vom Durchgang des Grobboden-Siebsatzes werden zwei Teilproben erstellt, wobei eine für die Feinsiebung und die andere für das Pipettierverfahren verwendet werden.

Übersteigt der geschätzte Anteil des Grobbodens 10 % hingegen nicht, kann auf eine Fraktionierung des Grobbodens verzichtet werden und die Analyse erfolgt nur durch eine Nasssiebung mit dem Feinboden-Siebsatz und durch das Pipettierverfahren, wobei für beide Versuche zwei getrennte Bodenproben aus der Urprobe zu entnehmen sind.

Weicht das Pipettierungsergebnis für den Sandanteil stark vom Ergebnis der Feinsiebung ab, ist die Pipettierung zu wiederholen. Wird der Wert des Pipettierverfahren bestätigt, ist die Feinsiebung zu wiederholen. Kann dann immer noch keine ausreichende Übereinstimmung zwischen der Siebung und dem Pipettierverfahren erzielt werden, ist die Probe anderweitig zu untersuchen. Das kann insbesondere bei sehr hohem Sandanteil der Fall sein, bei dem das Pipettierverfahren fehleranfällig ist.

3.3 Trockensiebung Grobboden

Der Grobboden umfasst alle Bodenteilchen mit einer Korngröße $d \geq 2$ mm. Blöcke werden im Rahmen der landeskulturellen Wasserwirtschaft nicht untersucht. Der Grobboden nimmt an den Speicher- und Austauschvorgängen des Bodens nur unwesentlich teil, beeinflusst aber durch sein Volumen den Luft- und Wasserhaushalt.
Für bodenkundliche Untersuchungen zur Beurteilung des Bodens hinsichtlich seiner Eignung als Pflanzenstandort ist die Schätzung des Grobbodenanteils im Allgemeinen ausreichend, für geotechnische Zwecke ist hingegen fast immer eine Siebung erforderlich.

Geräte

- Siebsatz 16 mm – 11,2 mm – 8 mm – 5,6 mm – 4 mm – 2 mm
  (eventuell auch 70 mm – 50 mm – 30 mm – 20 mm – 15 mm – 7,0 mm – 3,0 mm – 2,0 mm)
- Waage; Genauigkeit mindestens ±1 g
- Wägeschale

Gegebenenfalls (bei anhaftendem Feinboden)

- Sieb mit 2,0 mm Maschenweite, eventuell zusätzlich gröbere Siebe
- Bottich
- Schlauch

Probenvorbereitung

Die Mindestmasse der Bodenprobe für die Siebanalyse des Grobbodens richtet sich nach dem Größtkorn d_{max}. Da für Böden mit größeren Schotterteilchen oder Steinen eine erhebliche Masse erforderlich ist, ist schon bei der Probennahme vor Ort das Größtkorn abzuschätzen und ausreichend Material für die Laboruntersuchung zu entnehmen. Es ist auch darauf zu achten, dass eine ausreichende Masse an Feinboden für die Nasssiebung und Schlämmung aus der Grobbodensiebung anfällt. Etwaige organische Bestandteile sind zu entfernen.

Tabelle 3-5: Mindestmasse der Bodenprobe für die Siebanalyse des Grobbodens (in Anlehnung an ÖNORM B 4412, zitiert in ÖNORM L 1061-1 [2002]

bei geschätzter größter Korngröße d_{max} des anstehenden Bodens vor Ort in mm	Mindestmasse für die Siebanalyse in kg
2	0,15
5	0,30
10	0,70
20	2,0
30	5,0
40	7,0
50	12
60	18

Durchführung

Aggregate mit einem Äquivalentdurchmesser ≥ 2 mm werden gegebenenfalls mechanisch zerstört.

Haftet Feinboden am Grobboden, ist vor der Trockensiebung der Feinanteil weitestgehend trocken zu entfernen und der Boden zu waschen. Hierfür wird der Boden händisch mit dem 2-mm-Sieb (eventuell sind auch gröbere Siebe zu verwenden, um eine Überlastung des 2-mm-Siebes zu vermeiden) über einem Bottich trocken gesiebt; der Durchgang (Feinboden) ist aus dem Bottich zu entfernen und aufzubewahren. Anschließend wird der Siebrückstand mit Leitungswasser gewaschen und das Waschwasser im Bottich aufgefangen.
Nach dem Absetzen der Suspension (Wartefrist mindestens ein Tag) wird das überstehende, klare Wasser abgehebert und verworfen und die restliche Suspension luftgetrocknet. Der Suspensionsrückstand wird dem Durchgang 2 mm der händischen Trockensiebung beigefügt. Der Siebrückstand aus der Waschung wird ebenfalls luftgetrocknet.

Der luftgetrocknete Grobboden wird gewogen (m_{ges}) und auf den Grobboden-Siebsatz aufgebracht, der je nach Größtkorn d_{max} folgende Siebe umfasst:

16 mm – 11,2 mm – 8 mm – 5,6 mm – 4 mm – 2 mm

(Für besonders grobe Böden steht auch ein alter Rundloch-Siebsatz zur Verfügung:

70 mm – 50 mm – 30 mm – 20 mm – 15 mm – 7,0 mm – 3,0 mm – 2,0 mm).

Die Siebung wird entweder händisch oder mit der Siebmaschine so lange fortgeführt, bis sich die Verteilung der Korngrößen nicht mehr verändert. In der Regel ist eine Siebdauer von 10 Minuten ausreichend.

Die einzelnen Siebrückstände werden in die Wägeschale geleert und gewogen ($m_{GR\ d gr\ i}$).
Wurde der Durchgang 2 mm wegen anhaftendem Feinboden vor der eigentlichen Siebung abgetrennt, sollte bei der Siebung praktisch kein Durchgang mehr anfallen. Der ursprüngliche Durchgang 2 mm aus der trockenen Handsiebung, der luftgetrocknete Spülrückstand und der Durchgang 2 mm aus der eigentlichen Siebung werden sorgfältig vermengt und gewogen (m_D). Aus diesem Feinboden werden die Proben für die Feinsiebung und für die Pipettierung gewonnen.

Auswertung

Die Massensumme aller Siebrückstände samt dem Durchgang 2 mm muss weniger als 0,5 % von der Einwaage abweichen, ansonsten ist die Probe zu verwerfen:

$$\frac{m_{ges} - m_D - \sum_{i=1}^{n} m_{GR\ d gr\ i}}{m_{ges}} < 0{,}005 .$$

$[m_{ges}]$	= g	lufttrockene Gesamtmasse der Bodenprobe für die Grobsiebung
$[m_{GR\ d gr\ i}]$	= g	lufttrockene Masse eines bestimmten Grobsiebrückstandes i mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{gr\ i}$
$[m_D]$	= g	lufttrockene Masse des Durchgangs 2,0 mm
$[n]$	= 1	Anzahl der Siebe
$[i]$		Laufvariable, der die einzelnen Siebmaschenweiten zugeordnet sind. $1 \le i \le n$. Der Siebrückstand mit dem Index $i = 1$ umfasst die Korngrößenklasse

$$p\,[d_{\max} > d \geq d_{\text{gr}\,1}],\ \text{für}\ \ i = n\ \ \text{gilt}\ \ [d_{\text{gr}\,n-1} > d \geq 2\,\text{mm}]$$

Der Massenanteil p in Prozent einer einzelnen Grobboden-Korngrößenklasse $d_{\text{gr}\,i-1} > d \geq d_{\text{gr}\,i}$, wobei $d_{\text{gr}\,i}$ den Äquivalentdurchmesser bzw. die Maschenweite eines bestimmten Siebes und $d_{\text{gr}\,i-1}$ denjenigen des nächstgröberen Siebes kennzeichnet, entspricht dem Quotienten aus dem jeweiligen Siebrückstand $m_{\text{GR}\,d\text{gr}\,i}$ und der gesamten Probenmasse m_{ges}

$$\frac{p\,[d_{\text{gr}\,i-1} > d \geq d_{\text{gr}\,i}]}{\%} = \frac{m_{\text{GR}\,d\text{gr}\,i}}{m_{\text{ges}}} \times 100\,. \qquad 1 \leq i \leq n$$

$[p]$	= %	prozentueller Massenanteil einer bestimmten Siebfraktion i an der Gesamtprobe
$[d_{\text{gr}\,i-1}]$	= mm	oberer Grenzdurchmesser einer bestimmten Siebfraktion i; für $i = 1$ gilt $d_{\text{gr}\,0} = d_{\max}$.
$[d_{\text{gr}\,i}]$	= mm	unterer Grenzdurchmesser einer bestimmten Siebfraktion i ($d_{\text{gr}\,n} = 2$ mm)
$[d_{\text{gr}\,0}]$	= mm	Größtkorn der Bodenprobe; $d_{\text{gr}\,0} = d_{\max}$

Zum Beispiel entspricht der Massenanteil p der Korngrößenklasse $8{,}0\,\text{mm} > d \geq 5{,}6\,\text{mm}$

$$\frac{p\,[8{,}0\,\text{mm} > d \geq 5{,}6\,\text{mm}]}{\%} = \frac{m_{\text{GR}\,5{,}6\,\text{mm}}}{m_{\text{ges}}} \times 100\,.$$

Der Skelettanteil bzw. der Anteil des Grobbodens [$d \geq 2$ mm] an der Gesamtprobe beträgt in Prozent

$$\boxed{\frac{p\,[\text{Grobboden}]}{\%} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{m_{\text{GR}\,d\text{gr}\,i}}{m_{\text{ges}}} \times 100\right)}\,.$$

$[p\,[\text{Grobboden}]]$	= %	prozentueller Massenanteil des Grobbodens an der Gesamtprobe
$[m_{\text{GR}\,d\text{gr}\,i}]$	= g	lufttrockene Masse eines bestimmten Grobsiebrückstandes i mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{\text{gr}\,i}$
$[m_{\text{ges}}]$	= g	lufttrockene Gesamtmasse der Bodenprobe für die Grobsiebung
$[n]$	= 1	Anzahl der Siebe

oder

$$\frac{p\,[\text{Grobboden}]}{\%} = \frac{100}{m_{\text{ges}}} \cdot \sum_{i=1}^{n} m_{\text{GR}\,d\text{gr}\,i}$$

und der des Feinbodens [2 mm > d]

$$\frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%} = 100 - \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{m_{\text{GR}\,d\text{gr}\,i}}{m_{\text{ges}}} \times 100\right).$$

bzw.

$$\boxed{\frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%} = 100 - \frac{p\,[\text{Grobboden}]}{\%}}\,. \qquad (3\text{-}1)$$

$[p\,[\text{Feinboden}]]$	= %	prozentueller Massenanteil des Feinbodens [2 mm > d] an der Gesamtprobe

Der Massenfehler wird durch diese Berechnungsweise dem Durchgang zugeordnet. Die Rechnung

$$\frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%} = \frac{m_{\text{Durchgang}}}{m_{\text{ges}}} \times 100$$

ist unter dieser Annahme **nicht korrekt!**

Zur Konstruktion der Kornsummenlinie der Gesamtprobe sind die prozentuellen Anteile der einzelnen Klassen der Reihe nach von 100 % abzuziehen. Ein einzelner Punkt i der Linie, der dem Massenanteil p aller Partikel mit einem Äquivalentdurchmesser $d \geq d_{\mathrm{gr}\,i}$ $(1 \leq i \leq n)$ entspricht, ergibt sich aus

$$\frac{p\,[d \geq d_{\mathrm{gr}\,i}]}{\%} = 100 - 100 \times \sum_{j=1}^{i} \left(\frac{m_{\mathrm{GR}\,d\mathrm{gr}\,j}}{m_{\mathrm{ges}}} \right) \qquad 1 \leq i \leq n\,.$$

$[p\,[d \geq d_{\mathrm{gr}\,i}]] = \%$ prozentueller Massenanteil aller Bodenpartikel mit einem Äquivalentdurchmesser $d \geq d_{\mathrm{gr}\,i}$ an der Gesamtprobe bzw. Punkt der Durchgangslinie $(d_{\mathrm{gr}\,i}, p)$

$[m_{\mathrm{GR}\,d\mathrm{gr}\,j}] = \mathrm{g}$ lufttrockene Masse eines bestimmten Grobsiebrückstandes j mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{\mathrm{gr}\,j}$

$[m_{\mathrm{ges}}] = \mathrm{g}$ lufttrockene Gesamtmasse der Bodenprobe für die Grobsiebung

$[n] = 1$ Anzahl der Siebe

3.4 Probenvorbereitung für die Feinbodenanalyse

Das Vorbereiten einer lufttrockenen Feinbodenprobe ist nur für die Urprobe (bei geschätztem Grobbodenanteil < 10 %) erforderlich. Wenn eine Grobbodenanalyse erfolgte, kann unmittelbar der Siebdurchgang 2,0 mm herangezogen werden.
Pro Parallelprobe für die Feinbodenanalyse sind 100 g für die Feinsiebung plus 20 g für das Absetzverfahren erforderlich.

3.4.1 Vorbereitung einer lufttrockenen Bodenprobe (nur bei Grobbodenanteil < 10 %)

Es wird ausreichend Bodenmaterial der Urprobe für die Feinsiebung, das Absetzverfahren und eventuell andere Analysen gemeinsam vorbereitet.

Geräte und Reagenzien

- 2-mm-Sieb
- Reibschalen und Mörser

Durchführung

a) gesamte Bodenmasse in einer ausreichend großen Reibschale an der Luft trocknen lassen
b) grobe Aggregate kurz mit dem Mörser zerdrücken, bis überwiegend Partikel < 2,0 mm vorliegen
c) händische Siebung mit dem 2-mm-Sieb, bei größeren Bodenmengen portionsweise; Siebrückstand in eine kleinere Reibschale befördern
d) Aggregate > 2,0 mm im Siebrückstand grob mit dem Mörser zerkleinern, ohne dabei etwaige Grobbodenpartikel zu zerstören; organische Bestandteile entfernen
e) Grobbodenpartikel und zerkleinerte Aggregate bzw. Reibschaleninhalt mit dem Siebdurchgang sorgfältig vermengen

3.4.2 Ansetzen der Proben für die Feinsiebung und für das Absetzverfahren

Für die Feinsiebung und für das Absetzverfahren werden Parallelproben in getrennten Zylindern angesetzt.

Geräte und Reagenzien

- 2-mm-Sieb
- Wägeschiffchen
- Sedimentationsgefäß (Absetzzylinder) mit 1000-mL-Marke sowie Gummistopfen
- Waage; Genauigkeit mindestens 10^{-2} g für die Siebung und 10^{-4} g (Analysenwaage) für das Absetzverfahren
- 0,4 n Natriumpyrophosphat-Lösung zur Dispergierung; hierfür werden 89,22 g $Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O$ in einem 2-L-Messkolben mit wenig Wasser aufgelöst, auf 2,000 L mit entionisiertem Wasser aufgefüllt und mit dem Magnetrührer gerührt
- 250-mL-Messzylinder
- Überkopfschüttler
- Spritzflasche, mit entionisiertem Wasser gefüllt

Durchführung

a) Für die Feinsiebung ist entweder
   a.a) bei einem geschätzten Grobbodenanteil $\geq 10\,\%$ eine Teilprobe des Siebrückstandes aus der Grobbodensiebung (Masse m_{s+w}') oder
   a.b) eine Teilprobe der Urprobe (Masse m_{ges})
   mit 100,00 g in ein Wägeschiffchen einzuwägen
b) Für das Absetzverfahren sind gut 20 g in das 2-mm-Sieb zu leeren und durch Handsiebung etwaige Grobbodenpartikel abzutrennen. Vom Siebdurchgang sind 20,00 g (mit der Analysenwaage auf 10^{-4} g gewogen) in ein Wägeschiffchen einzuwägen (Masse m_{s+w})
c) Bodeneinwaage in einen Absetzzylinder kippen und Dispergiermittellösung zusetzen:
   c.a) 250 mL für die Feinsiebung und
   c.b) 50 mL für das Absetzverfahren
d) mindestens 8 Stunden stehen lassen
e) rund 200 mL entionisiertes Wasser zusetzen
f) Zylinder mit Gummistopfen verschließen, in den Überkopfschüttler einspannen und 6 Stunden schütteln
g) Gummistopfen öffnen und anhaftende Bodenpartikel mit der Spritzflasche in den Zylinder spülen

3.5 Nasssiebung des Feinbodens

Die Nasssiebung des Feinbodens dient zur Bestimmung des Sandanteils am Feinboden und zur weiteren Unterteilung der Sandfraktion. Bei Böden mit geringem Grobkornanteil – bei denen eine Grobsiebung unterblieb – erfolgt auch die Aufteilung der Gesamtprobe in Grob- und Feinbodenanteil.

Geräte und Reagenzien

- Spritzflasche, mit Leitungswasser gefüllt
- Schale
- Siebsatz 2,0 mm – 1,0 mm – 0,63 mm – 0,20 mm – 0,125 mm – 0,063 mm
- Rüttelgerät
- 6 Abdampfschalen, mit Nummern versehen
- Trockenschrank

Durchführung

a) 0,063-mm-Sieb auf das Rüttelgerät aufsetzen, dispergierte Probe im Absetzzylinder in kleinen Mengen auf das Sieb leeren (am Sedimentationsgefäß haftende Bodenpartikel mit der Spritzflasche auf das Sieb spülen) und mit einem Wasserstrahl durchschwemmen; Ablauf wird verworfen
b) Siebrückstand 0,063 mm mit der Spritzflasche in eine Schale spülen
c) kompletten Siebsatz für die Nasssiebung des Feinbodens
   2,0 mm – 1,0 mm – 0,63 mm – 0,20 mm – 0,125 mm – 0,063 mm
   auf das Rüttelgerät aufsetzen und die Bodenprobe aus der Schale auf das 2-mm-Sieb leeren
d) Spülkopf aufsetzen und mit der Nasssiebvorrichtung so lange rütteln, bis keine Partikel mehr durch die Siebe fallen und der Ablauf klar ist. Das kann wenige Minuten, aber auch bis zu einer Stunde dauern. Ablauf wird wieder verworfen
e) einzelne Siebrückstände werden mit der Spritzflasche (von der Siebober- und –unterseite) in zuvor gewogene Abdampfschalen ($m_{\mathrm{Sch}\,i}$) gespült und im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Massenkonstanz (etwa über Nacht) getrocknet
f) Schalen aus dem Trockenschrank stellen, rund eine Stunde frei stehend auskühlen lassen und schließlich wägen ($m_{\mathrm{Sch+s+w}\,i}$)

Anmerkung

Bei der Feinsiebung wird zuerst die Fraktion $d < 0{,}063$ mm abgeschieden, weil Bodenproben mit höheren Schluff- und Tonanteilen oft die Siebe verlegen und bei der Nasssiebvorrichtung zum Überquellen führen. Dies kann bei der manuellen Spülung mit etwas Vorsicht vermieden werden.

3.5.1 Auswertung

Um die Masse eines bestimmten, lufttrockenen Siebrückstandes i zu erhalten, muss man die Masse der entsprechenden Schale abziehen: $\boxed{m_{\mathrm{SR}\,d\mathrm{gr}\,i} = m_{\mathrm{Sch+s+w}\,i} - m_{\mathrm{Sch}\,i}}$.

$[m_{SR\ d gr\ i}]$ = g (lufttrockene) Masse eines bestimmten Siebrückstandes i der Feinsiebung mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{gr\ i}$
$[m_{Sch+s+w\ i}]$ = g Masse der Schale mit dem lufttrockenen Siebrückstand
$[m_{Sch\ i}]$ = g Masse der Schale

Die weitere Auswertung hängt davon ab, ob die Bodenprobe nur aus Feinboden besteht oder auch einen Grobbodenanteil enthält.

a) Ohne Grobbodensiebung

Wenn auf eine Grobsiebung verzichtet wurde und die Bodenprobe auch Grobpartikel enthält, stellt sie eine Gesamtprobe mit der Masse m_{ges} dar und der Quotient aus eingedampftem Siebrückstand und m_{ges} liefert unmittelbar die Massenanteile an der Gesamtprobe. Insbesondere ergibt sich für den Grobboden- bzw. Skelettanteil ($d \geq 2$ mm) in Prozent

$$\frac{p\,[\text{Grobboden}]}{\%} = \frac{m_{SR\ 2\ mm}}{m_{ges}} \times 100 \qquad [d \geq 2\,\text{mm}]\,.$$

$[p\,[\text{Grobboden}]]$ = % prozentueller Massenanteil des Grobbodens an der Gesamtprobe
$[m_{SR\ 2\ mm}]$ = g (lufttrockene) Masse des Siebrückstandes des obersten Siebes mit der Maschenweite 2,0 mm, die Grobbodenfraktion $[d \geq 2$ mm$]$ beinhaltend
$[m_{ges}]$ = g lufttrockene Bodeneinwaage für die Feinsiebung, enthält im Allgemeinen einen geringen Grobbodenanteil

und für den Feinbodenanteil

$$\frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%} = 100 - \frac{p\,[\text{Grobboden}]}{\%} \qquad [2\,\text{mm} > d] \qquad (3\text{-}2)$$

oder

$$\frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%} = \frac{m_{ges} - m_{SR\ 2\ mm}}{m_{ges}} \times 100\,.$$

$[p\,[\text{Feinboden}]]$ = % prozentueller Massenanteil des Feinbodens $[2$ mm $> d]$ an der Gesamtprobe

Einen bestimmten, durch den Bereich $[d \geq d_{gr\ i}]$ ($1 \leq i \leq n$, wobei n die Anzahl der Siebe ist) definierten Punkt der Kornsummenlinie erhält man mittels

$$\frac{p\,[d \geq d_{gr\ i}]}{\%} = 100 - 100 \times \sum_{j=1}^{i} \left(\frac{m_{SR\ d gr\ j}}{m_{ges}} \right) \qquad 1 \leq i \leq n\,.$$

$[p\,[d \geq d_{gr\ i}]]$ = % prozentueller Massenanteil aller Bodenpartikel mit einem Äquivalentdurchmesser $d \geq d_{gr\ i}$ an der Gesamtprobe bzw. Punkt der Durchgangslinie $(d_{gr\ i}, p)$
$[m_{SR\ d gr\ j}]$ = g lufttrockene Masse eines bestimmten Siebrückstandes j mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{gr\ j}$
$[m_{ges}]$ = g lufttrockene Bodeneinwaage für die Feinsiebung, enthält im Allgemeinen einen geringen Grobbodenanteil
$[n]$ = 1 Anzahl der Siebe; üblicherweise ist $n = 6$

Für die Bodentextur ist der prozentuelle Massenanteil der Sandfraktion am Feinboden erforderlich:

$$\frac{p\,[\text{Sand}]}{\%} = \frac{\sum_{i=2}^{n} m_{\text{SR } d\text{gr } i}}{m_{\text{ges}} - m_{\text{SR 2 mm}}} \times 100 \qquad (3\text{-}3)$$

$[p\,[\text{Sand}]] = \%$ Sandanteil; prozentueller Massenanteil der Sandfraktion [2,0 mm > $d \geq$ 0,063 mm] **am Feinboden** [2 mm > d]

$[m_{\text{SR } d\text{gr } i}] = \text{g}$ lufttrockene Masse eines bestimmten Siebrückstandes i mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{\text{gr } i}$. Die Summe umfasst alle Siebe mit Ausnahme des gröbsten mit $d_{\text{gr } 1}$ = 2,0 mm

$[m_{\text{ges}}] = \text{g}$ lufttrockene Bodeneinwaage für die Feinsiebung, enthält im Allgemeinen einen geringen Grobbodenanteil

$[m_{\text{SR 2 mm}}] = \text{g}$ (lufttrockene) Masse des Siebrückstandes des obersten Siebes mit der Maschenweite 2,0 mm, die Grobbodenfraktion [$d \geq$ 2 mm] beinhaltend

$[n] = 1$ Anzahl der Siebe; üblicherweise ist n = 6

b) Probe enthält praktisch nur Feinboden

In diesem Fall wurde die Bodenprobe für die Feinsiebung aus einem Teil des Siebrückstandes der Trockensiebung des Grobbodens (inklusive des 2-mm-Siebes) gewonnen. Sollte das oberste, 2-mm-Sieb der Nasssiebung dennoch einen Siebrückstand enthalten, so ist die Feinsiebung zu wiederholen, wenn der Fehler 0,5 % übersteigt:

$$\frac{m_{\text{SR 2 mm}}}{m_{\text{s+w}}'} \times 100 < 0{,}5 \,.$$

$[m_{\text{SR 2 mm}}] = \text{g}$ (lufttrockene) Masse des Siebrückstandes des obersten Siebes mit der Maschenweite 2,0 mm, sollte Null sein

$[m_{\text{s+w}}'] = \text{g}$ Bodeneinwaage für die Feinsiebung (dürfte keinen Grobboden enthalten)

Weil die Massenanteile der Siebrückstände vorerst auf die Feinbodenmasse bezogen werden, ist die Masse des eventuellen Siebrückstandes 2 mm $m_{\text{SR 2 mm}}$ von der Bodeneinwaage $m_{\text{s+w}}'$ abzuziehen

$$m_{\text{s+w}} = m_{\text{s+w}}' - m_{\text{SR 2 mm}} \,.$$

$[m_{\text{s+w}}] = \text{g}$ korrigierte Bodeneinwaage für die Feinsiebung; enthält nur Feinboden

$[m_{\text{s+w}}'] = \text{g}$ Bodeneinwaage für die Feinsiebung (Grobboden sollte durch die Grobsiebung abgetrennt worden sein)

$[m_{\text{SR 2 mm}}] = \text{g}$ (lufttrockene) Masse des Siebrückstandes des obersten Siebes mit der Maschenweite 2,0 mm, sollte Null sein

Der **Massenanteil** p in Prozent einer einzelnen Feinboden-Korngrößenklasse [$d_{\text{gr } i-1} > d \geq d_{\text{gr } i}$] **am Feinboden**, wobei $d_{\text{gr } i}$ den Äquivalentdurchmesser bzw. die Maschenweite eines bestimmten Siebes und $d_{\text{gr } i-1}$ denjenigen des nächstgröberen Siebes kennzeichnet, entspricht dem Quotienten aus dem entsprechenden Siebrückstand $m_{\text{SR } d\text{gr } i}$ und der korrigierten Feinbodenmasse $m_{\text{s+w}}$

$$\frac{p\,[d_{\text{gr } i-1} > d \geq d_{\text{gr } i}]}{\%} = \frac{m_{\text{SR } d\text{gr } i}}{m_{\text{s+w}}} \times 100 \,, \qquad 1 \leq i \leq n$$

wobei $d_{\text{gr } 0}$ = 2,0 mm und $d_{\text{gr } n}$ = 0,063 mm ist.

Z. B. entspricht der Massenanteil p der Korngrößenklasse [0,63 mm > d ≥ 0,2 mm] (Mittelsand) am Feinboden $\dfrac{p\,[0{,}63\text{ mm} > d \geq 0{,}2\text{ mm}]}{\%} = \dfrac{m_{\text{SR 2 mm}}}{m_{\text{s+w}}} \times 100\,.$

Für die Bestimmung der Bodentextur ist der Anteil der Sandfraktion am Feinboden erforderlich:

$$\frac{p\,[\text{Sand}]}{\%} = 100 \times \sum_{i=2}^{n} \frac{m_{\text{SR } d\text{gr } i}}{m_{\text{s+w}}} \tag{3-4}$$

[p [Sand]] = % Sandanteil; **prozentueller Massenanteil der Sandfraktion** [2,0 mm > d ≥ 0,063 mm] **am Feinboden** [2 mm > d]

[$m_{\text{SR } d\text{gr } i}$] = g lufttrockene Masse eines bestimmten Siebrückstandes i mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{\text{gr } i}$. Die Summe umfasst alle Siebe mit Ausnahme des gröbsten mit $d_{\text{gr } 1}$ = 2,0 mm

[$m_{\text{s+w}}$] = g korrigierte Bodeneinwaage für die Feinsiebung; enthält nur Feinboden

[n] = 1 Anzahl der Siebe; üblicherweise ist n = 6

Für die Kornsummenlinie sind die **Massenanteile** der einzelnen Korngrößenklassen nicht auf die Masse des Feinbodens $m_{\text{s+w}}$ zu beziehen, sondern auf die Masse der **Gesamtprobe** m_{ges}. Nachdem 100 % korrigierte Feinbodenmasse $m_{\text{s+w}}$ einen prozentuellen Massenanteil an der Gesamtprobe von p [Feinboden] gemäß Gl. 3-1 besitzen, beträgt der Anteil einer beliebigen Fraktion [$d_{\text{gr } i-1} > d \geq d_{\text{gr } i}$] an der Gesamtprobe

$$\frac{p\,[d_{\text{gr } i-1} > d \geq d_{\text{gr } i}]}{\%} = \frac{m_{\text{SR } d\text{gr } i}}{m_{\text{s+w}}} \times \frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%}\,. \qquad 1 \leq i \leq n$$

Einen bestimmten, durch den Bereich [$d \geq d_{\text{gr } i}$] ($2 \leq i \leq n$; wobei n die Anzahl der Siebe bei der Feinsiebung ist) definierten Punkt der Kornsummenlinie erhält man mittels

$$\frac{p\,[d \geq d_{\text{gr } i}]}{\%} = \frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%} - \sum_{j=2}^{i} \left(\frac{m_{\text{SR } d\text{gr } j}}{m_{\text{s+w}}} \times \frac{p\,[\text{Feinboden}]}{\%} \right)\,. \qquad 2 \leq i \leq n.$$

[p [$d \geq d_{\text{gr } i}$]] = % prozentueller Massenanteil aller Bodenpartikel mit einem Äquivalentdurchmesser $d \geq d_{\text{gr } i}$ an der Gesamtprobe bzw. Punkt der Durchgangslinie ($d_{\text{gr } i}$, p)

[$m_{\text{SR } d\text{gr } j}$] = g lufttrockene Masse eines bestimmten Siebrückstandes j mit dem unteren Grenzdurchmesser bzw. mit der Siebmaschenweite $d_{\text{gr } j}$. Die Summe umfasst alle Siebe mit Ausnahme des gröbsten mit $d_{\text{gr } 1}$ = 2,0 mm

[$m_{\text{s+w}}$] = g korrigierte Bodeneinwaage für die Feinsiebung; enthält nur Feinboden

[p [Feinboden]] = % prozentueller Massenanteil des Feinbodens [2 mm > d] an der Gesamtprobe gemäß Formel 3-1

[n] = 1 Anzahl der Siebe; üblicherweise ist n = 6

3.6 Pipettierverfahren nach Kubiena

Das Pipettierverfahren ist ein Absetzverfahren und dient zur Bestimmung des Schluff- und des Tonanteils am Feinboden.

Geräte und Reagenzien

- Pipettiervorrichtung und Wasserbad
- 4 Abdampfschälchen, mit Nummern versehen
- Trockenschrank
- Thermometer, Genauigkeit mindestens 0,1 °C
- Stoppuhr
- entionisiertes Wasser

Durchführung

a) Temperatur in der Pipettierwanne mittels Zufuhr von Frischwasser auf (21,0±0,4) °C einstellen, Sedimentationsgefäße in die Wanne stellen
b) dispergierte Bodenprobe im Sedimentationsgefäß bis auf 1000-mL-Marke mit entionisiertem Wasser auffüllen, zuwarten und Temperatur der Bodensuspension im Zylinder und des Wasserbades prüfen
c) Zylinder mit der Hand kurz durchschütteln, wieder in der Wanne absetzen und Stoppuhr starten (nächsten Zylinder nach genau drei Minuten abstellen)
d) Nach rund 20 Sekunden Pipette mit der Pipettiervorrichtung im ersten Zylinder 10,0 cm unter die Flüssigkeitsoberfläche eintauchen (siehe Markierung auf der Pipette), Dreiwegehahn öffnen, Volumen für die erste Pipette (geringfügig mehr als 20 mL) genau nach 27 s ansaugen und Hahn durch eine Vierteldrehung im Uhrzeigersinn schließen
e) Überschuss an Suspension mittels einer weiteren Vierteldrehung des Dreiwegehahnes im Uhrzeigersinn in den seitlichen Behälter entleeren und ein wenig spülen; verbleibendes Pipettevolumen von genau 20 mL in Abdampfschälchen mit bekannter Masse $m_{\mathrm{Sch}\,i}$ (auf ±0,1 mg gewogen) ablassen, Pipette spülen und Spülflüssigkeit ebenfalls in das Abdampfschälchen ablaufen lassen
f) für die zweite Pipettierung Pipette wieder 10,0 cm unter die Flüssigkeitsoberfläche eintauchen, Volumen nach 4 min 32 s entnehmen, dritte Pipette nach 50 min 19 s und vierte in 5,0 cm Tiefe nach 3 h 46 min 25 s. Pipette jedes Mal spülen und Spülflüssigkeit in das Abdampfschälchen ablaufen lassen. Nach der letzten Pipette Temperatur der Suspension messen.
g) Abdampfschälchen in den Trockenschrank stellen, Suspension bei 105 °C eindampfen
h) am nächsten Tag Schälchen herausnehmen, eine Stunde offen auskühlen lassen und wägen ($m_{\mathrm{Sch+s+w}\,i}$)

Auswertung

Die Bodenmasse in den Abdampfschälchen erhält man nach Abzug der Dispergiermittelmasse

$$m_{\mathrm{PR}\,dgr\,i} = m_{\mathrm{Sch+s+w}\,i} - m_{\mathrm{Sch}\,i} - 0{,}0266\ \mathrm{g}$$

$[m_{PR\ d gr\ i}]$ = g (lufttrockene) eingedampfte Bodenmasse einer bestimmten Pipettenentnahme
$[m_{Sch+s+w\ i}]$ = g Masse der Schale mit dem (lufttrockenen) Eindampfrückstand, Boden und Dispergiermittel enthaltend
$[m_{Sch\ i}]$ = g Masse der Eindampfschale
0,0266 g Masse des Dispergiermittels in 20 mL Pipettevolumen (siehe Anhang) (50 mL 0,4-n $Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O$ auf einem Liter Suspension)

Unmittelbar nach der Homogenisierung ist die Partialdichte der gesamten lufttrockenen Feinbodeneinwaage m_{s+w} in jedem Milliliter der Suspension mit dem Volumen V_{Zyl} dieselbe; sie beträgt $\rho_s^* = m_{s+w}/V_{Zyl}$. Der (lufttrockene) Eindampfrückstand $m_{PR\ d gr\ i}$ eines Pipettenvolumens V_P, das zu einer dem Grenzdurchmesser $d_{gr\ i}$ entsprechenden Zeit entnommen wurde, enthält Feinbodenpartikel der Kornfraktion $[d_{gr\ i} > d]$ in derselben Konzentration bzw. Partialdichte $m_{PR\ d gr\ i}/V_P$ wie die Suspension unmittelbar nach der Homogenisierung. In dieser war die Fraktion daher mit einer Masse von $(m_{PR\ d gr\ i}/V_P) \cdot V_{Zyl}$ vertreten. Daraus ergibt sich für die Fraktion $[d_{gr\ i} > d]$ ein **prozentueller Massenanteil am Feinboden** von

$$\frac{p\,[d_{gr\ i} > d]}{\%} = \frac{\frac{m_{PR\ d gr\ i}}{V_P} \cdot V_{Zylinder}}{m_{s+w}} \times 100 = \frac{m_{PR\ d gr\ i}}{m_{s+w}} \cdot \frac{V_{Zyl}}{V_P} \times 100\,.$$

Mit $V_{Zylinder} = 1{,}000\,L$ und $V_P = 0{,}020\,L$ erhält man $\frac{p\,[d_{gr\ i} > d]}{\%} = \frac{m_{PR\ d gr\ i}}{m_{s+w}} \times 5000\,.$ (3-5)

Für die erste Pipette, die keine Sandpartikel bzw. nur die Schluff- und Tonfraktion $[d < 0{,}063\,mm]$ enthält, gilt daher $\frac{p\,[Schluff + Ton]}{\%} = \frac{m_{PR\ 0{,}063\ mm}}{m_{s+w}} \times 5000\,.$

Nachdem $p\,[Sand] + p\,[Schluff] + p\,[Ton] = 100\,\%$ Feinboden ergibt, beträgt der aus der Pipettierung ermittelte Sandanteil am Feinboden

$$\boxed{\frac{p\,[Sand]_{Pipettierung}}{\%} = 100 - \frac{m_{PR\ 0{,}063\ mm}}{m_{s+w}} \times 5000}\,.$$

$[p\,[Sand]_{Pipettierung}]$ = % prozentueller Massenanteil der Sandfraktion am Feinboden; ermittelt aus der Pipettierung
$[m_{PR\ 0{,}063\ mm}]$ = g (lufttrockene) eingedampfte Bodenmasse der ersten, 0,063-mm-Pipette
$[m_{s+w}]$ = g (lufttrockene) Bodeneinwaage für das Absetzverfahren (in etwa 20,00 g)

Der Sandanteil wird also sowohl mit der Siebung (Formel 3-3 oder Formel 3-4) als auch mit der Pipettierung bestimmt. Nachdem bei den beiden Verfahren zwei verschiedene Teilproben verwendet werden und überdies die Fraktionierung auf unterschiedlichen Prinzipien beruht, treten Abweichungen auf. Der Unterschied sollte jedoch weniger als 5 % betragen:

$$\boxed{\left| \frac{p\,[Sand]_{Feinsiebung}}{\%} - \frac{p\,[Sand]_{Pipettierung}}{\%} \right| < 5}$$

Bei größerem Unterschied ist das Absetzverfahren zu wiederholen. Wird das Ergebnis des Absetzverfahrens bestätigt, ist die Feinsiebung zu wiederholen.
Die gesamte Abweichung zwischen Siebung und Absetzverfahren wird als Fehler der ersten Pipette interpretiert und der Prozentwert für die Sandfraktion aus dem Absetzverfahren verworfen.

Die weiteren Pipetten ergeben gemäß Formel 3-5 folgende prozentuellen Massenanteile am Feinboden

$$\frac{p\,[d_{\mathrm{gr}\,i} > d]}{\%} = \frac{m_{\mathrm{PR}\,d\mathrm{gr}\,i}}{m_{\mathrm{s+w}}} \times 5000 \qquad 2 \le i \le n$$

$[p\,[d < d_{\mathrm{gr}\,i}]] = \%$ prozentueller Massenanteil der Fraktion $[d < d_{\mathrm{gr}\,i}]$ am Feinboden [2 mm > d]
$[m_{\mathrm{PR}\,d\mathrm{gr}\,i}] = \mathrm{g}$ (lufttrockene) eingedampfte Bodenmasse einer bestimmten Pipette mit dem Grenzdurchmesser $d_{\mathrm{gr}\,i}$
$[m_{\mathrm{s+w}}] = \mathrm{g}$ (lufttrockene) Bodeneinwaage für das Absetzverfahren (in etwa 20,00 g)
$[n] = 1$ Anzahl der Pipettierungen; $n = 4$

Der ***Tonanteil*** beträgt

$$\frac{p\,[\mathrm{Ton}]}{\%} = \frac{m_{\mathrm{PR}\ 0{,}002\ \mathrm{mm}}}{m_{\mathrm{s+w}}} \times 5000$$

$[p\,[\mathrm{Ton}]] = \%$ prozentueller Massenanteil der Tonfraktion am Feinboden
$[m_{\mathrm{PR}\ 0{,}002\ \mathrm{mm}}] = \mathrm{g}$ (lufttrockene) eingedampfte Bodenmasse der letzten, 0,002-mm-Pipette
$[m_{\mathrm{s+w}}] = \mathrm{g}$ (lufttrockene) Bodeneinwaage für das Absetzverfahren (in etwa 20,00 g)

und der ***Schluffanteil***

$$\frac{p\,[\mathrm{Schluff}]}{\%} = 100 - \frac{p\,[\mathrm{Sand}]_{\mathrm{Feinsiebung}}}{\%} - \frac{p\,[\mathrm{Ton}]}{\%}.$$

$[p\,[\mathrm{Schluff}]] = \%$ prozentueller Massenanteil der Schlufffraktion am Feinboden
$[p\,[\mathrm{Sand}]_{\mathrm{Feinsiebung}}] = \%$ prozentueller Massenanteil der Sandfraktion am Feinboden; ermittelt aus der Feinsiebung
$[p\,[\mathrm{Ton}]] = \%$ prozentueller Massenanteil der Tonfraktion am Feinboden

Nachdem die erste Pipette nach dem Abgleich Siebung – Absetzverfahren verworfen wird, ist die Rechnung

$$\frac{p\,[\mathrm{Schluff}]}{\%} = \frac{m_{\mathrm{PR}\ 0{,}063\ \mathrm{mm}} - m_{\mathrm{PR}\ 0{,}002\ \mathrm{mm}}}{m_{\mathrm{s+w}}} \times 5000$$ <u>nicht korrekt!</u>

Die Genauigkeit des Analyseverfahrens kann grob mit einem Fehler von knapp unter einem Prozent angegeben werden. Dies rechtfertigt eine Angabe der Anteile in Zehntelprozent. Um zu vermeiden, dass die Summe der drei Texturanteile wegen der Rundungen von 100 % abweicht, sollte der Schluffanteil mit den auf eine Kommastelle gerundeten Werten in Prozent für $p\,[\mathrm{Sand}]$ und für $p\,[\mathrm{Ton}]$ berechnet werden.

Für die Kornsummenlinie sind die **Massenanteile** der einzelnen Korngrößenklassen nicht auf die Masse des Feinbodens $m_{\mathrm{s+w}}$ zu beziehen, sondern auf die Masse der **Gesamtprobe** m_{ges}. Nachdem der Feinboden einen prozentuellen Massenanteil an der Gesamtprobe von $p\,[\mathrm{Feinboden}]$ gemäß Gl. 3-1 besitzt, beträgt der Anteil einer beliebigen Pipettierfraktion $[d_{\mathrm{gr}\,i} > d]$ an der Gesamtprobe $[d_{\mathrm{max}} > d]$

$$\frac{p\,[d_{\mathrm{gr}\,i} > d]}{\%} = \frac{m_{\mathrm{PR}\,d\mathrm{gr}\,i}}{m_{\mathrm{s+w}}} \times 50 \times \frac{p\,[\mathrm{Feinboden}]}{\%}. \qquad 2 \le i \le n$$

$[p\,[d_{\mathrm{gr}\,i} > d]] = \%$ prozentueller Massenanteil der Fraktion $[d_{\mathrm{gr}\,i} > d]$ an der Gesamtprobe (Summenlinie), gilt nicht für die erste Pipette mit $i = 1$!

$[m_{PR\ d\mathrm{gr}\ i}] = \mathrm{g}$	(lufttrockene) eingedampfte Bodenmasse einer bestimmten Pipette mit dem Grenzdurchmesser $d_{\mathrm{gr}\ i}$
$[m_{s+w}] = \mathrm{g}$	(lufttrockene) Bodeneinwaage für das Absetzverfahren (in etwa 20,00 g)
$[n] = 1$	Anzahl der Pipettierungen; $n = 4$

Theorie

Die Reibungskraft auf eine Kugel, die sich mit der Geschwindigkeit v relativ zum Fluid bewegt, ist nach Stokes anzusetzen mit $F_R = 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v$.
Das Gewicht einer Kugel beträgt $F_G = 4\,r^3 \cdot \pi \cdot \rho_s \cdot g / 3$
und die auf sie wirkende Auftriebskraft $F_A = 4\,r^3 \cdot \pi \cdot \rho_l \cdot g / 3$.
Für das Kräftegleichgewicht einer vertikal fallenden Kugel in einer ruhenden Flüssigkeit muss gelten $F_G = F_R + F_A$
bzw. $F_R = F_G - F_A$ $\quad 6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta \cdot v = 4\,r^3 \cdot \pi \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot g / 3$,
woraus man nach Kürzen $\eta \cdot v = 2\,r^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot g / 9$,
Umformen und Substituieren mit $r = d/2$ das Stokessche Gesetz erhält. Diesem zufolge beträgt die Fallgeschwindigkeit eines Partikels mit dem äquivalenten Korndurchmesser d

$$v = \frac{d^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot g}{18 \cdot \eta}.$$

$[v]$	$\mathrm{cm \cdot s^{-1}}$	Fallgeschwindigkeit
$[d]$	cm!!	äquivalenter Korndurchmesser
$[\rho_s]$	$\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$	mittlere Feststoffdichte; separat mit dem Pyknometer bestimmt (kann näherungsweise mit $\rho_s = 2{,}65\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ angenommen werden)
$[\rho_l]$	$\mathrm{g \cdot cm^{-3}}$	Dichte der Dispergierflüssigkeit (ohne Feststoffe); wird konstant mit $\rho_l = 1{,}00\ \mathrm{g \cdot cm^{-3}}$ angenommen
$[g]$	$\mathrm{cm \cdot s^{-2}}$	Fallbeschleunigung; Normwert für Österreich: $g_n = 980{,}665\ \mathrm{cm \cdot s^{-2}}$
$[\eta]$	$\mathrm{g \cdot s_{-1} \cdot cm^{-1}}$	dynamische Viskosität der Suspension, abhängig von der Temperatur. Es wird angenommen, dass diese der Viskosität von Wasser entspricht (siehe Kapitel 12.1). $1\ \mathrm{mPa \cdot s} \equiv 1\ \mathrm{g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}} \equiv 1 \times 10^{-2}\ \mathrm{g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}}$

Die Fallzeit t, die ein Partikel von der Suspensionsoberfläche bis zum Erreichen einer Tiefe h benötigt, beträgt bei angenommener konstanter Fallgeschwindigkeit

$$t = \frac{h}{v}.$$

Der Formelwert $\eta\,(t = 21{,}0\ ^\circ\mathrm{C}) = 0{,}977\ \mathrm{mPa \cdot s}$ für die dynamische Viskosität bei der im Wasserbad eingestellten Temperatur von 21,0 °C ergibt mit der Falltiefe h von 10 cm bzw. 5 cm die für die jeweiligen Grenzdurchmesser bzw. Pipetten geltenden Fall- bzw. Entnahmezeiten, die in der Beschreibung der Versuchsdurchführung unter Punkt 4) bzw. 6) angegeben sind.

Die Anwendungsgrenze des Stokesschen Gesetzes ist bei niedrigen Sinkgeschwindigkeiten durch Konvektionsströmungen, durch die Brownsche Molekularbewegung, die bei Sedimentation im Schwerefeld etwa ab Partikelgrößen < 1 µm (≡ < 0,001 mm) zu beachten ist, und durch die Bildung von Agglomeraten während der langen Sedimentationszeit beschränkt [DIN 66 111, 1989]. Bei den größeren Teilchen sind insbesondere die zeitlich genaue Pipettenentnahme bzw. die Trennschärfe und die Abhängigkeit vom Anfangszustand (Entnahme der ersten Pipette nach rund 27 s!) problematisch.

KORNGRÖSSENANALYSE — geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Probennummer Labor:	034/2000	analysiert am:	2000-02-30
Entnahmedaten:	Bergltal E10/40-60	Bearbeiter:	F. Forster

FEINSIEBUNG

Masse lufttrockene Bodeneinwaage m_{ges} / g =					100,04	Massenanteile
i	SR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g.	Masse Siebrückstand (g) $m_{SR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$	p / % **p [Grobb.] / % =** $100 \times m_{SR2,0}/m_{ges}$
1	2,0	276	69,98	70,92	0,94	**0,9**
Masse Feinboen (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\,2,0\,mm}$ =					99,10	**99,1**
2	1,0	130	108,54	109,54	1,00	**p [Feinb.] / % =**
3	0,63	158	69,56	70,21	0,65	$100 \times m_{s+w}/m_{ges}$
4	0,20	152	70,80	73,64	2,84	Sandanteil
5	0,125	121	109,20	112,57	3,37	$p\,[S]_S$ / % = $100 \times (\Sigma m_{SR\,i}) / m_{s+w}$ =
6	0,063	II	108,30	117,03	8,73	
Masse Sand $m\,[S]_S$ (g) = $\Sigma m_{SR\,i}$ (i = 2…6) =					16,59	16,7

PIPETTIERVERFAHREN nach Kubiena

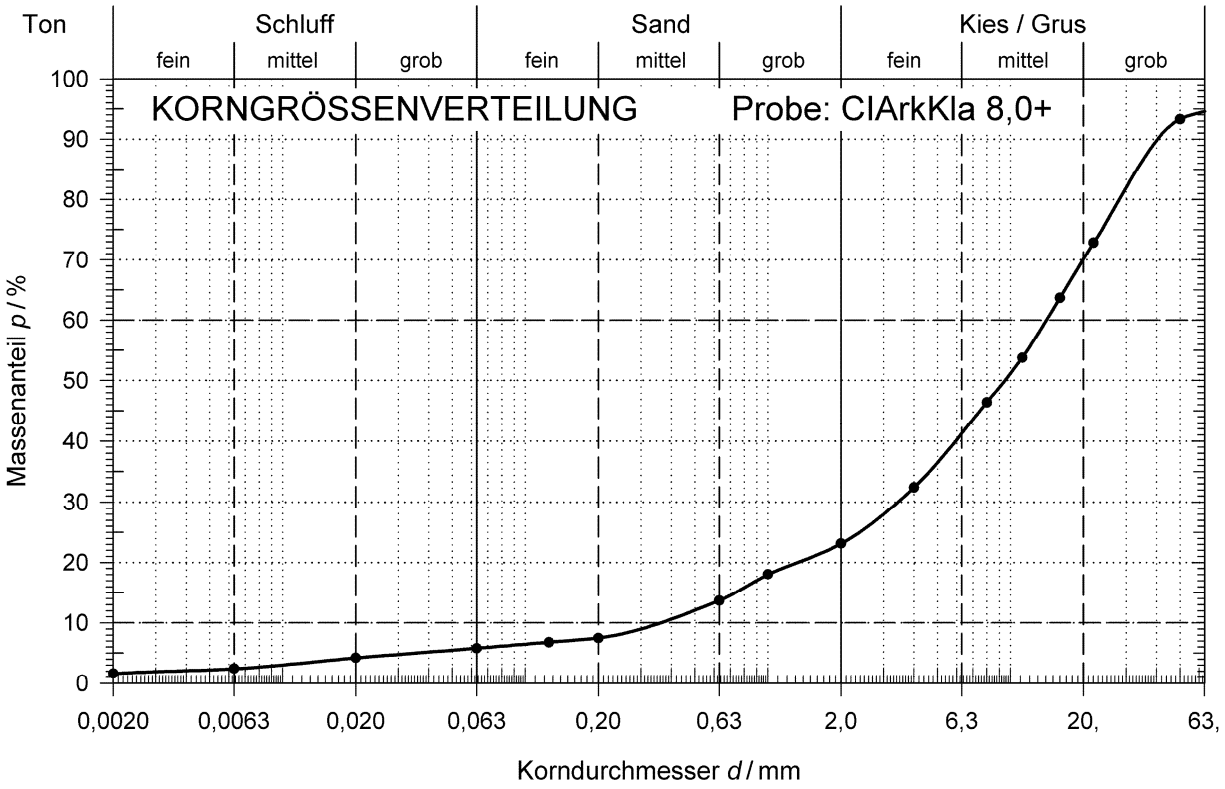
Susp.temp. zu Beginn t_A / °C =			21,0		*: = $5000 \times m_{PR\,0,063\,mm} / m_{s+w}$
Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g =			20,0001	Masse Eindampfrückstd (g)	Massenanteile
i	PR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g	$m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$ − 0,0266	p / %
1	0,063	1	59,8107	60,1629	0,3256	−81,4 *
2	0,020	12	56,6314	56,8302	0,1722	= 18,6
3	0,0063	41	70,0442	70,1741	0,1033	= $p\,[S]_P$ / %
4	0,0020	66	60,8117	60,9104	0,0721	$p\,[S]_S - p\,[S]_P$ =
Susp.temperatur nach der Pipettierung t_E/°C =				21,1		−1,9

Massenanteile von Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) am Feinboden:

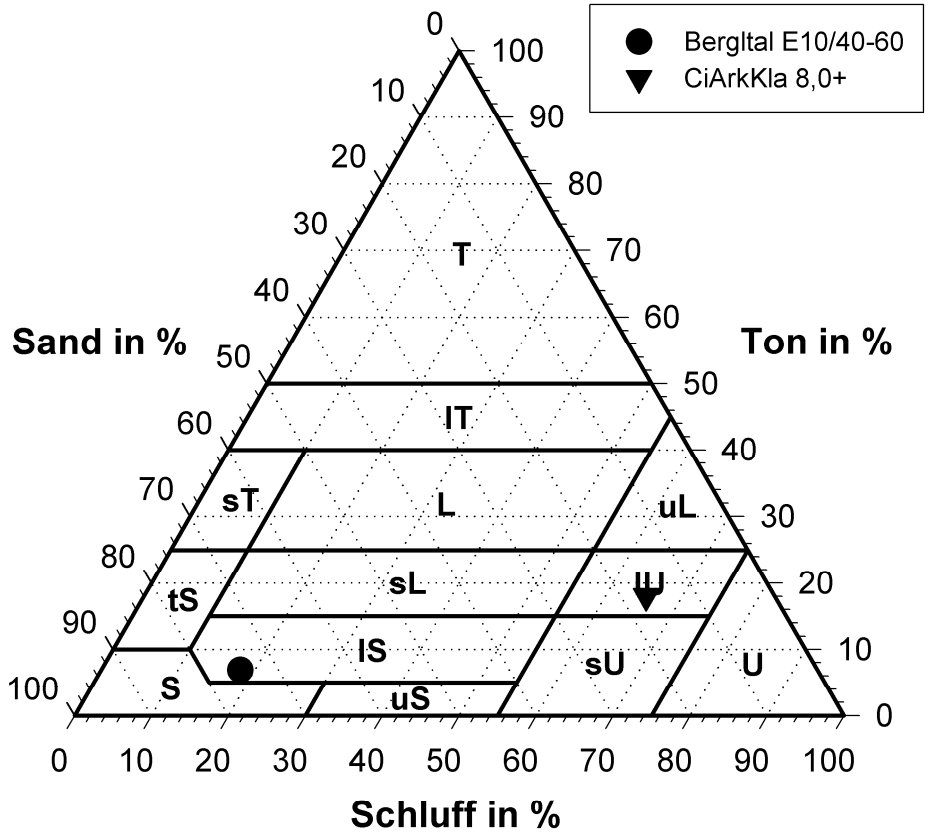
p [S] / % =	**16,7**	p[U]/% =	**65,3**	p[T]/% =	**18,0**

Fraktionsbereich d / mm	Fraktionsanteil am **Gesamtboden** Δp / %	**Summenlinie** $p\,[d < d_{gr\,i}]$ / % **100,0**	untere Fraktionsgrenze $d_{gr\,i}$ / mm 6,3	Fraktionsanteil am **Feinboden** Δp / %	Summenlinie Fein-boden p / %
$d_{max} > d \geq 2,0$	0,9	**99,1**	2,0		100,0
$2,0 > d \geq 1,0$	1,0	**98,1**	1,0	1,0	99,0
$1,0 > d \geq 0,63$	0,6	**97,4**	0,63	0,7	98,3
$0,63 > d \geq 0,20$	2,8	**94,6**	0,20	2,9	95,5
$0,20 > d \geq 0,125$	3,4	**91,2**	0,125	3,4	92,1
$0,125 > d \geq 0,063$	8,7	**82,5**	0,063	8,8	83,3
$0,063 > d \geq 0,125$	39,8	**42,6**	0,020	40,2	43,0
$0,020 > d \geq 0,0063$	17,1	**25,6**	0,0063	17,2	25,8
$0,0063 > d \geq 0,002$	7,7	**17,9**	0,0020	7,8	18,0
$0,0020 > d$	17,9	0		18,0	0

untere Fraktionsgrenze $d_{gr\,i}$ / mm	Summenlinie $p\,[d < d_{gr\,i}] = m\,[d < d_{gr\,i}] / m_{ges}$	Δp	d_i / mm	$1 / d_i$ / mm^{-1}	$\Delta p / d_i$ / mm^{-1}
6,3	1,000				
2,0	0,991	0,009	3,0361	0,33	0,003
1,0	0,981	0,010	1,3333	0,75	0,007
0,63	0,974	0,006	0,7730	1,29	0,008
0,20	0,946	0,028	0,3036	3,29	0,094
0,125	0,912	0,034	0,1538	6,50	0,219
0,063	0,825	0,087	0,0838	11,94	1,042
0,020	0,426	0,398	0,0304	32,94	13,119
0,0063	0,256	0,171	0,0096	104,37	17,808
0,0020	0,179	0,077	0,0030	329,37	25,449
0,001	0	0,179	0,0013	750,00	133,917
d_w / mm =	**0,0052**	1,000		***OVZ* =**	**192**



d_{60} = 14,1 mm d_{10} = 0,362 mm $U = d_{60}/d_{10}$ = 39,0 $C = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10})$ = 2,3 OVZ = 18 d_w = 0,057 mm d_{max} = 100 mm



Österreichisches Texturdreieck nach ÖNORM L 1050

4. BESTIMMUNG DER MATRIXPOTENZIAL-WASSERANTEIL-BEZIEHUNG IM LABOR

Für den niederen Wasserspannungsbereich wird das Kapillarimeter nach Fischer verwendet. Obwohl dieses bis zu einer Wasserspannungshöhe von rund 8 m einsetzbar wäre, wird es wegen der beschränkten Laborraumhöhe nur bis 1,5 m verwendet. Eine Ausschöpfung des Anwendungsbereiches wäre mittels Unterdruckapparatur oder einer hängenden Quecksilbersäule möglich.
Im höheren Wasserspannungsbereich wird die Matrixpotenzial-Wasseranteil-Beziehung mit der Überdruckapparatur ermittelt (Druckplattenapparat, manchmal auch nur als Drucktopf bezeichnet). Nachdem die Standard-Stechzylinderproben mit 5,0 cm Höhe bei vielen Böden eine sehr lange Versuchsdauer nach sich ziehen würden, werden für den Druckplattenapparat nicht dieselben ungestörten Proben wie für das Kapillarimeter verwendet, sondern zusätzlich entnommene mit einer Stechzylinderhöhe von 2,5 cm.
Während die gewünschte Matrixpotenzialhöhe bzw. die nötige Druckdifferenz zwischen dem Druck in der Gasphase und dem in der flüssigen Phase beim Kapillarimeter durch eine Reduzierung des Drucks in der flüssigen Phase mittels hängender Wassersäule erreicht wird, wird beim Druckplattenapparat der Druck in der Gasphase (in den luftgefüllten Poren) erhöht. Bei beiden Verfahren werden jedenfalls die einzelnen Wasserspannungen eingestellt und die entsprechenden Wasseranteile gemessen.
Eine Alternative zum Kapillarimeter mit dem Anwendungsbereich 0 bar bis 1 bar ist die sogenannte „Tempe-Cell“ (auch als „Haines-apparatus“ bezeichnet). Die Funktionsweise ist dieselbe wie die des Druckplattenapparates; in der Apparatur ähnelt sie eher dem Kapillarimeter.

4.1 Kapillarimeter nach Fischer für den niederen Bereich

Die Standardapparatur ist für die stufenweise Entwässerung mit pF-Werten von 1,0 bis 2,2 bzw. von 10 cm bis 150 cm WS geeignet; bei Verwendung einer Unterdruckapparatur können Wasserspannungshöhen bis etwa 800 cm (pF 2,9) angelegt werden.
Die Anzahl und Höhe der einzustellenden Wasserspannungen richtet sich nach der Bodenprobe und dem Zweck der Untersuchung (üblich etwa: 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm und 150 cm). Im Allgemeinen wird nur die Hauptdränfunktion (Entwässerungskurve) erstellt.
Die Untersuchung wird im Regelfall an einer ungestörten Bodenprobe in 5 cm hohen Stechzylindern mit bekannter Masse (m_{St}) und bekanntem (Gesamt-)Volumen $V_{St} = V$ ($V_{St} \approx 200\,cm^3$) durchgeführt. Die Lufteintrittshöhe der Bodenprobe muss mindestens $h_e = 7$ cm betragen (entspricht einem Größtporendurchmesser von etwa 0,4 mm), weil die Probe sonst schon bei der Wägung entwässert und nicht erst im Kapillarimeter.

Apparatur

- Glasfilternutsche mit poröser Keramikfilterplatte, Porosität 4 (Lufteintrittshöhe $h_e = 187$ cm)
- Abdeckfolie (Alu oder Plastik)
- vakuumfester, diffusionsdichter Schlauch, Länge 2 m; eventuell kurze Verbindungsstücke

- 25-mL-Messpipette mit 0,1-mL-Teilung
- Laborhalter für die Nutsche, stufenweise verschiebbare Montierung für die Messpipette und fixe Skala
- 30-mL-Einmalspritze mit Schlauch und langer Kanüle
- hohe Wasserwanne

Durchführung

Vorweg ist die gesamte Anlage vollständig mit Wasser zu sättigen. Hierfür wird die Wasserwanne mit entlüftetem Leitungswasser (elektrische Leitfähigkeit messen und angeben!) bis zu einer Höhe gefüllt, die ein wenig kleiner ist als die Höhe der Filternutsche. Das Stutzenende der Filternutsche wird zugehalten und die Nutsche mit dem Stutzen voran schräg untergetaucht und verkehrt abgesetzt, sodass das Stutzenende aus dem Wasser ragt und freigegeben werden kann. Das Wasser steigt nun langsam von unten durch die Filterplatte und verdrängt die Luft aus dem unteren Teil der Glasfilternutsche nach oben, ohne Luftblasen zu hinterlassen. Wenn der Wasserspiegel in der Nutsche beinahe bis zum Außenwasserspiegel angestiegen ist, wird die Wanne weiter gefüllt und die Nutsche mehrere Zentimeter überstaut. Der Schlauch und die Messpipette werden ebenfalls untergetaucht bzw. gesättigt und schließlich Filternutsche, Schlauch und Messpipette unter Wasser miteinander verbunden. Die Filternutsche und die Messpipette werden gemeinsam aus dem Wasserbad gehoben und die Nutsche dabei so umgedreht, dass sich die Innenseite der Nutsche entleeren kann. Schließlich wird die Filternutsche an einem Laborhalter montiert und auch die Messpipette, und zwar mit der Unterkante der mL-Teilung knapp unterhalb der Filterplattenoberkante. Durch Absaugen von Wasser mit der Spritze mit langer Kanüle wird der Wasserspiegel in der Messpipette grob auf das Niveau der Filterplattenoberkante eingestellt und durch vertikales Verschieben der Pipette feinjustiert. Das Ausgangsvolumen in der Messpipette ist abzulesen und zu notieren ($V_{\mathrm{Pip}\,0}$).

Die Stechzylinder-Bodenprobe wird im Wasserbad vollständig gesättigt, der Zylinder im Wasserbad aufgerichtet (Zylinderachse horizontal), in dieser Stellung aus dem Wasser gehoben und auf die Waage platziert und gewogen (m_{ges}). Die Filternutsche wird aus ihrer Halterung genommen, ein wenig gekippt, die Bodenprobe vorsichtig auf die Filterplatte gesetzt und die Filternutsche wieder montiert. Zur Verringerung der Verdunstungsverluste wird die Nutsche während der Untersuchung mit einer Folie abgedeckt (jedoch nicht druckdicht verschlossen, damit keine Druckdifferenz zum Atmosphärendruck entstehen kann).
Nun wird die erste, kleinste Wasserspannung bzw. Druckstufe h_0 in der Bodenprobe durch Absenken der Messpipette und damit des Wasserspiegels in der Pipette angelegt. Infolge der Entwässerung der Probe fließt das Wasser langsam durch die Filterplatte und der Wasserspiegel in der Messpipette steigt an. Dies bedingt ein häufiges Nachstellen auf die gewünschte Wasserspannung. Dieser Vorgang wird so oft durchgeführt, bis innerhalb von 7 Stunden kein Wasseranstieg mehr in der Messpipette zu erkennen ist. Die neue Pipettenablesung $V_{\mathrm{Pip}\,1}$ abzüglich der vorherigen ($V_{\mathrm{Pip}\,0}$) ergibt das von der Bodenprobe abgegebene Wasservolumen (ein Teilstrichintervall entspricht 0,1 mL bzw. 0,05 % Wasseranteil).
Sollte die Bodenprobe so viel Wasser abgegeben haben, dass annähernd die Oberkante der mL-Teilung der Messpipette erreicht ist, wird mit der Einmalspritze der Wasserspiegel durch Absaugen wieder knapp über die Unterkante der mL-Teilung eingestellt. Um Hysteresis-Effekte zu vermei-

den, sollte die Messpipette während der Entnahme nach oben geschoben werden, sodass die angelegte Wasserspannung nur unwesentlich vergrößert wird und der Wasserspiegel keinesfalls unterhalb der nächsten Druckstufe zu liegen kommt. Der neue Stand in der Messpipette ist sofort abzulesen und zu notieren. Zusätzlich ist das entfernte Wasservolumen durch Wägung der Einmalspritze vor und nach dem Absaugen zu bestimmen ($\Delta V = \Delta m / \rho_{H2O}$) und zu notieren.
Für die nächste Druckstufe wird die Messpipette bzw. der Wasserspiegel auf die nächstgrößere Wasserspannung h_i abgesenkt und wieder mehrmals nachjustiert, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen der eingestellten Wasserspannung und dem in der Bodenprobe gehaltenen Wasservolumen eingestellt hat. Danach ist erneut das Pipettenvolumen $V_{Pip\,i}$ abzulesen und das abgegebene Wasservolumen als Differenz zum Ausgangsvolumen zu berechnen.

Nach Ablesung der letzten Druckstufe ($V_{Pip\,Ende}$) wird die Stechzylinderprobe wieder gewogen (m_{St+s+w}) und damit später die Volumenablesung kontrolliert.

Schließlich wird der Stechzylinder mit der nun teilweise entwässerten Bodenprobe im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen (m_{St+s}).

Auswertung

Vorweg ist eine wesentliche Kontrolle durchzuführen. Die durch die Wasserdichte dividierte Massendifferenz zwischen der voll gesättigten Probe und der teilentwässerten Probe nach der letzten Druckstufe muss gleich dem gesamten abgegebenen Wasservolumen sein:

$$\left| \Delta V_{ges} - \frac{m_{ges} - m_{St+s+w}}{\rho_{H2O}} \right| < 0{,}2\ \text{mL}$$

$[\Delta V_{ges}] = \text{mL}$	Differenz zwischen der Messpipettenablesung am Ende und zu Beginn plus sämtlicher abgezogener Volumina: $\Delta V_{ges} = V_{Pip\,Ende} - V_{Pip\,0} + \Sigma\,\Delta V$
$[V_{Pip\,Ende}] = \text{mL}$	Messpipettenablesung am Ende (nach der letzten Druckstufe)
$[V_{Pip\,0}] = \text{mL}$	Messpipettenablesung zu Beginn (vor Aufsetzen der gesättigten Probe)
$[\Sigma\,\Delta V] = \text{mL}$	Summe sämtlicher mit der Einmalspritze abgezogenen Volumina
$[m_{ges}] = \text{g}$	Masse des Stechzylinders mit der vollgesättigten Bodenprobe (zu Beginn)
$[m_{St+s+w}] = \text{g}$	Masse des Stechzylinders mit der teilweise entwässerten Bodenprobe (am Ende)
$[\rho_{H2O}] = \text{g·mL}$	Dichte von Wasser; kann konstant mit $\rho_{H2O} = 1{,}00$ g/mL angenommen werden

Aufgrund der diversen Überbestimmungen hat man für die Auswertung der einzelnen Druckstufen bestimmte Annahmen zu treffen. Wenn man den Versuchsfehler eher der Phase von der Wägung im gesättigten Zustand bis zur ersten Druckstufe und weniger den Verdunstungsverlusten zuschreibt, dann ist vom Wasseranteil am Ende des Versuches θ_{Ende} auszugehen. Dieser errechnet sich aus

$$V_{w\,Ende} = \frac{m_{St+s+w} - m_{St+s}}{\rho_{H2O}}$$

$$\theta_{Ende} = \frac{V_{w\,Ende}}{V} = \frac{\dfrac{m_{St+s+w} - m_{St+s}}{\rho_{H2O}}}{V_{St}}.$$

Den zu einer beliebigen Druckstufe bzw. Wasserspannung h_i (mit Ausnahme der Vollsättigung) zuzuordnenden Wasseranteil θ_i erhält man, indem man θ_{Ende} und die auf das Stechzylindervolumen bezogene Differenz der beiden Messpipettenablesungen am Ende und für die entsprechende Druckstufe – gegebenenfalls zuzüglich einem (oder mehrerer) entfernten Volumen – addiert:

$$\theta_i = \theta_{\text{Ende}} + \frac{V_{\text{Pip Ende}} - V_{\text{Pip }i} + \Delta V}{V_{\text{St}}} = \frac{\frac{m_{\text{St+s+w}} - m_{\text{St+s}}}{\rho_{\text{H2O}}} + V_{\text{Pip Ende}} - V_{\text{Pip }i} + \Delta V}{V_{\text{St}}} \qquad i > 0$$

Der Wasseranteil bei Vollsättigung sollte hingegen nicht aus der Messpipettenablesung $V_{\text{Pip }0}$ (für $V_{\text{Pip }i}$ in der obigen Gleichung eingesetzt), sondern aus den beiden Wägungen ermittelt werden. Das gesamte in der Bodenprobe enthalten gewesene Bodenwasservolumen (der durch die Wasserdichte dividierte Massenverlust zwischen der gesättigten und der ofentrockenen Bodenprobe) beträgt

$$V_{\text{w sat}} = \frac{m_{\text{ges}} - m_{\text{St+s}}}{\rho_{\text{H2O}}}$$

$[V_{\text{w sat}}] = \text{cm}^3$ Wasservolumen in der Bodenprobe bei Vollsättigung; der durch die Wasserdichte dividierte Massenverlust zwischen der gesättigten und der ofentrockenen Bodenprobe

und der Sättigungswasseranteil $\theta_{\text{sat}} = \frac{V_{\text{w sat}}}{V} = \frac{\frac{m_{\text{ges}} - m_{\text{St+s}}}{\rho_{\text{H2O}}}}{V_{\text{St}}}$.

$[\theta_{\text{sat}}] = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ Wasseranteil bei Vollsättigung

Weiters kann angenommen werden, dass das Wasservolumen $V_{\text{w sat}}$ dem Porenvolumen V_{P} entspricht ($V_{\text{P}} \approx V_{\text{w sat}}$). Dann lässt sich der Porenanteil n angeben durch

$$n = \frac{V_{\text{P}}}{V} \approx \theta_{\text{sat}} = \frac{V_{\text{w sat}}}{V_{\text{St}}} = \frac{\frac{m_{\text{ges}} - m_{\text{St+s}}}{\rho_{\text{H2O}}}}{V_{\text{St}}}$$

$[n] = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ Porenanteil; entspricht (annähernd) dem Wasseranteil bei Vollsättigung
$[V_{\text{P}}] = \text{cm}^3$ Porenvolumen; entspricht (annähernd) dem Wasservolumen bei Vollsättigung

Anmerkung

Das Haupteinsatzgebiet von *Filternutschen* ist die Filtration in der Chemie. Dementsprechend ist die Porosität im Allgemeinen und die der Filterplatten im Besonderen in 6 Klassen eingeteilt, die sich an der Feinheit der bei der Filtration zurückzuhaltenden Stoffe orientieren und durch die Porenweite festgelegt sind. Für die bodenphysikalische Anwendung ist nicht die Porenweite entscheidend, sondern der Lufteintrittspunkt der Glasfilterplatten.

Ausgehend vom Gesetz für die kapillare Steighöhe in zylindrischen Röhren

$$h_{\text{K}} = \frac{4\,\sigma}{\rho \cdot g \cdot d_{\text{K}}} \cdot \cos\alpha$$

$[h_{\text{K}}] = \text{m}$ kapillare Steighöhe
$[\sigma] = \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ Oberflächenspannung; z. B. Luft – Wasser: $\sigma = 0{,}073$ N/m bei 20 °C
$[\rho] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ Dichte der Flüssigkeit
$[d_{\text{K}}] = \text{m}$ Durchmesser der Kapillare
$[\alpha] = \text{rad}$ Benetzungswinkel

erhält man mit den Werten $\rho_{\text{H2O}} = 1000\,\text{kg/m}^3$, $\sigma = 0{,}073$ N/m und $g = 9{,}81\,\text{m/s}^2$ und voller Benetzung von Glas mit Wasser ($\cos\alpha = 1$) als Faustformel für die Lufteintrittshöhe

$$\frac{h_e}{\text{cm}} = \frac{3{,}0}{d_K / \text{mm}}.$$

[h_e] = cm Lufteintrittshöhe; jene Höhe einer an der Filterplatte hängenden Wassersäule, ab der der Wassermeniskus in der Pore nicht mehr durch die Oberflächenkräfte gehalten werden kann und von der Luft verdrängt wird.
h_e entspricht der kapillaren Steighöhe

[d_K] = mm Durchmesser der Pore

Mit dieser Faustformel können den maximalen Porenweiten der einzelnen Porositätsklassen Mindest-Lufteintrittshöhen laut Tabelle 4-1 zugeordnet werden. Bei der Standard-Kapillarimeter-Apparatur ist keine größere Höhe der hängenden Wassersäule bzw. angelegte Wasserspannung als 1,5 m einstellbar. Dementsprechend reicht eine Filternutsche mit Porosität 4 aus. Wird der Unterdruck hingegen nicht mit einer hängenden Wassersäule angelegt, sondern mit einer Vakuum-Apparatur, sind Unterdrücke bzw. Druckstufen bis nahezu 1 bar möglich. In diesem Fall muss eine Filternutsche mit Porosität 5 genommen werden.

Tabelle 4-1: Porositätsklassen silikatischer Werkstoffe und zugehörige Lufteintrittshöhe

Porosität	Bezeichnung ISO 4793	Nennwert max. Porenweite / µm	Mindestlufteintrittshöhe h_e / cm	beispielhaftes Anwendungsgebiet in der Chemie
0	P 250	160–250	12	Gasverteilung in Fl. bei geringem Gasdruck
1	P 160	100–160	18	Grobfiltration
2	P 100	40–100	30	präparative Feinfiltration
3	P 40	16–40	75	analytische Filtration
4	P 16	10–16	187	analytische Feinfiltration
5	P 1,6	1,0–1,6	1870	Feinstfiltration

4.2 Druckplattenapparat für höhere Wasserspannungen

Bei dieser Methode wird eine zuvor gesättigte, ungestörte Bodenprobe einem stufenweise höheren Luftdruck im Drucktopf ausgesetzt und der Boden von Druckstufe zu Druckstufe immer stärker entwässert. Das bei einem eingestellten Überdruck in der Bodenprobe verbleibende Wasser wird im Ruhezustand vom Boden mit einer gleich großen, aber der Gasdruckkraft entgegengesetzt gerichteten Wasserspannungskraft festgehalten. Mit den gemessenen Wertepaaren Wasserspannung / Wasseranteil bei verschiedenen Druckstufen kann somit die Wasserspannungs-Wassergehaltsbeziehung im Bereich von pF 2,0 bis pF 4,18 des untersuchten Bodens angegeben werden.

Apparatur

der Fa. Soil Test, Evanston, Illinois, USA bestehend aus
- Mitteldrucktopf (pF 2,0 bis 3,7 bzw. (0,1–5) bar) mit Durchführungen, Deckel und Schrauben
- Hochdrucktopf (pF 3,7 bis 4,3 bzw. 5 bar–15 bar) mit Durchführungen, Deckel und Schrauben
- Konsolenstücke, Distanzhalter und Wasserableitschlauch
- Keramikplatten für Drücke bis 1 bar, 3 bar, 5 bar und 15 bar
- Kompressor mit Druckleitung, Reduzierventilen und Manometern
- Durchsichtiges Kontrollgefäß mit Abdeckung (Alu oder Plastik) und Schlauch
- Stechzylinder $h = 2{,}5$ cm, $V = 100$ cm^3

Durchführung

Folgende Druckstufen werden üblicherweise untersucht:

Mitteldrucktopf	mit	1-bar-Keramikplatte:	0,1 bar, 0,2 bar, 0,5 bar und 1,0 bar
	mit	3-bar-Keramikplatte:	1,0 bar, 2,0 bar und 3,0 bar
Hochdrucktopf	mit	15-bar-Keramikplatte:	3,0 bar, 5,0 bar, 10,0 bar und 15,0 bar

Je feinporiger eine Platte ist, desto größeren Druckdifferenzen zwischen der Gasphase und der wässrigen Phase widerstehen die Wassermenisken in den Poren und desto kleiner ist ihre Durchlässigkeit. Wird eine 3-bar-Platte mit 10 bar Gasdruck beaufschlagt oder wurde eine defekte 15-bar-Platte eingesetzt, dringt Luft durch die zu groben Poren und den Wasserableitschlauch nach außen und perlt im Kontrollgefäß sichtbar aus. Andererseits dauern die Druckstufen mit der 15-bar-Druckplatte bei wenig durchlässigen Böden Wochen und Monate, sodass man sich hüten sollte, diese für die 1- oder 2-bar-Druckstufe zu verwenden. Für die *Entwässerungskurve* wird die Untersuchung mit der niedrigsten Druckstufe (0,1 bar) begonnen und etappenweise bis zur höchsten Druckstufe (15,0 bar) durchgeführt.

Zu Beginn muss die Keramikplatte vollständig mit Wasser gesättigt werden. Die Platte wird dazu zwei Tage in entlüftetes, keimfreies Wasser gelegt (ersatzweise ist entlüftetes entionisiertes Wasser zu verwenden).
Die gesättigte Bodenprobe wird gewogen und dann auf die Platte gesetzt. Es ist dabei darauf zu achten, dass zwischen der Platte und der Probe ein fester Kontakt ohne Lufteinschlüsse besteht. Für Untersuchungen von Druckstufen bis 3,0 bar ist ferner zu beachten, dass die Poren an der Kontaktstelle durch zu starkes Andrücken der Probe an die Platte nicht verschmiert werden. Die Platte mit

der Bodenprobe wird nun in den Drucktopf auf den Distanzhalter oder auf die eingeschraubten Konsolenstücke gelegt und mit dem Wasserableitschlauch verbunden. An der Außenseite der Durchführung wird ebenfalls ein Stück Schlauch aufgeschoben und in ein Kontrollgefäß geführt, das mit etwas Wasser gefüllt und gewogen wurde und als Verdunstungsschutz abgedeckt wird. Nachdem der Drucktopf fest verschlossen worden ist (diagonales Andrehen der Schraubbolzen mit Drehmomentschlüssel), wird der Druck langsam bis zur gewünschten Druckstufe erhöht und anschließend konstant gehalten. Das aus dem Boden gedrückte Wasser wird über die Platte und den Ableitschlauch aus dem Drucktopf geleitet und im Kontrollgefäß gesammelt. Je nach Bodenart und Druckstufe wird unterschiedlich viel Wasser abgegeben. Das einzustellende Matrixpotenzial bzw. die Kraft, mit der das Wasser im Boden festgehalten wird, entspricht erst dann dem angelegten Gasdruck im Drucktopf, wenn kein Wasser mehr austritt und damit ein stationärer Ruhezustand erreicht ist. Das wird durch Wägung des Kontrollgefäßes überprüft und kann bei hohen Druckstufen einige Wochen dauern. Wird keine Gewichtszunahme mehr festgestellt, wartet man noch zwei Tage zu, reduziert dann den angelegten Druck bis zum Luftdruck und öffnet den Drucktopf. Hierauf wird die Bodenprobe vorsichtig von der Keramikplatte genommen und gewogen. Bleiben beim Abnehmen der Probe Bodenteilchen an der Platte kleben, so müssen diese mit einer Spachtel abgekratzt und mit der Bodenprobe mitgewogen werden. Zwischen dem Absenken des Gasdrucks auf Luftdruck und dem Abheben der Probe von der Platte sollte man nicht allzu viel Zeit verstreichen lassen, weil die Probe ansonsten wieder Wasser von der Platte aufnimmt.

Bevor die Bodenprobe für die Untersuchung der nächsthöheren Druckstufe auf die Platte aufgesetzt wird, wird die Platte mit einem dünnen Wasserfilm (entlüftetes, entionisiertes Wasser) benetzt, um wiederum einen guten Kontakt zwischen Bodenprobe und Platte zu erhalten. Man legt wieder die Platte in den Drucktopf und setzt fort wie zuvor.

Nach der letzten Druckstufe (15,0 bar) und der darauf folgenden Wägung wird die Bodenprobe in eine Abdampfschale gestellt und im Trockenschrank bei 105 °C bis zu Massenkonstanz getrocknet. Erst wird die Masse des getrockneten Bodens ermittelt und hierauf die einzelnen Wasseranteile bei den entsprechenden Druckstufen berechnet.

Die Resultate werden graphisch dargestellt, wobei auf der Ordinate die Wasserspannung (bzw. der pF-Wert) und auf der Abszisse der Wasseranteil aufgetragen wird. Gemeinsam mit den mittels Kapillarimeter erhaltenen Werten kann somit durch Verbinden der Punkte die Wasserspannungs-Wassergehaltslinie (bzw. pF-Kurve) dargestellt werden.

5. BESTIMMUNG DER WASSERDURCHLÄSSIGKEIT

5.1 *k*-Wert-Bestimmung im Labor – Methode mit aufsteigendem Wasserspiegel

Bei diesem Verfahren wird der Außenwasserspiegel bzw. die Zulaufhöhe annähernd konstant etwa 4,5 cm über der Oberkante der Bodenprobe gehalten und das zeitliche Ansteigen des Innenwasserspiegels über der Bodenprobe beobachtet.
Für die Versuchsdurchführung steht am Institut eine Apparatur zur Verfügung, die eine Online-Erfassung der Messgrößen und eine vollautomatische Auswertung per Computer ermöglicht.

Apparatur

- Stechzylinder als Aufsatzzylinder; $h = 5{,}00$ cm, $V = 200$ cm^3
- Wasserwanne auf horizontaler Unterlage
- Mariottesche Flasche
- Gummischlauchdichtung
- Messschiene und Schublehre
  alternativ: Ultraschall-Sensor für Außenwasserspiegel, Winkelschienenhalterung und Nadelaufsätze; Datenerfassung per Computer

Vorbereitung

Die zur Untersuchung gelangende Bodenprobe wird mittels eines Stechzylinders in natürlicher Lagerung, d. h. ungestört entnommen. Im Labor wird auf den Stechzylinder mit der Bodenprobe ein leerer Stechzylinder mit gleichem Durchmesser aufgesetzt; die beiden Zylinder werden mit einem Gummischlauch wasserdicht verbunden. Danach wird die Bodenprobe auf eine grobe Siebplatte mit Gazeauflage in einer leeren Wasserwanne gestellt. Nun wird in die Wanne vorsichtig und langsam entlüftetes Wasser durch Hebern mit einem Gummischlauch bis ca. 1 cm von der Unterkante der Bodenprobe eingefüllt. Die Bodenprobe wird langsam durch etappenweises Anheben des Wasserspiegels um jeweils 0,5 cm gesättigt und schließlich etwa 2 mm überstaut. Während dieses Vorganges sollte die Bodenluft nach oben möglichst langsam entweichen. Die Zeitabstände sind dabei von der Bodenart abhängig (sandige Böden – kurze Zeitabstände, tonige Böden – längere Zeitabstände).
Nach der vollständigen Sättigung wird der Wasserspiegel in der Wanne bis ca. 0,5 cm unter die Oberkante des aufgesetzten Stechzylinders erhöht und mittels einer Mariotteschen Flasche auf dieser Höhe möglichst konstant gehalten.

Messvorgang

Gemessen wird die zeitliche Änderung der Wasserspiegelhöhe im Stechzylinder zur Wasserspiegelhöhe in der Wanne. Die Messung erfolgt von einer Referenzhöhe (Messschiene) durch Abstichmessungen mit einer Schublehre. Die Genauigkeit der Ablesung muss 0,01 mm betragen (vgl. Skizze).

1. Messung: W_a zur Zeit $t_1 \rightarrow$ $h_{a\,1}$
W_i zur Zeit $t_1 \rightarrow$ $h_{i\,1}$
2. Messung: W_a zur Zeit $t_2 \rightarrow$ $h_{a\,2}$
W_i zur Zeit $t_2 \rightarrow$ $h_{i\,2}$

Da der Außenwasserspiegel in der Wanne möglichst konstant gehalten werden sollte, ist im Allgemeinen $h_{a\,1} = h_{a\,2}$.

Auswertung

$$k_s = \frac{L}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{h_{i\,1} - h_{a\,1}}{h_{i\,2} - h_{a\,2}}$$

$[k_s]$	$= cm \cdot s^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert (bei Sättigung)
$[L]$	= cm	Höhe des Stechzylinders bzw. der Bodenprobe
$[t_2]$	= s	Zeitpunkt der zweiten Ablesung (ab Beginn der Messung)
$[t_1]$	= s	Zeitpunkt der ersten Ablesung (ab Beginn der Messung)
$[h_{i\,1}]$	= cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Wasserspiegel über der Bodenprobe zum Zeitpunkt 1
$[h_{a\,1}]$	= cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Außenwasserspiegel (in der Wanne) zum Zeitpunkt 1
$[h_{i\,2}]$	= cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Wasserspiegel über der Bodenprobe zum Zeitpunkt 2
$[h_{a\,2}]$	= cm	Abstichmaß von einer Referenzhöhe bis zum Außenwasserspiegel (in der Wanne) zum Zeitpunkt 2. In der Regel gilt $h_{a\,1} = h_{a\,2}$

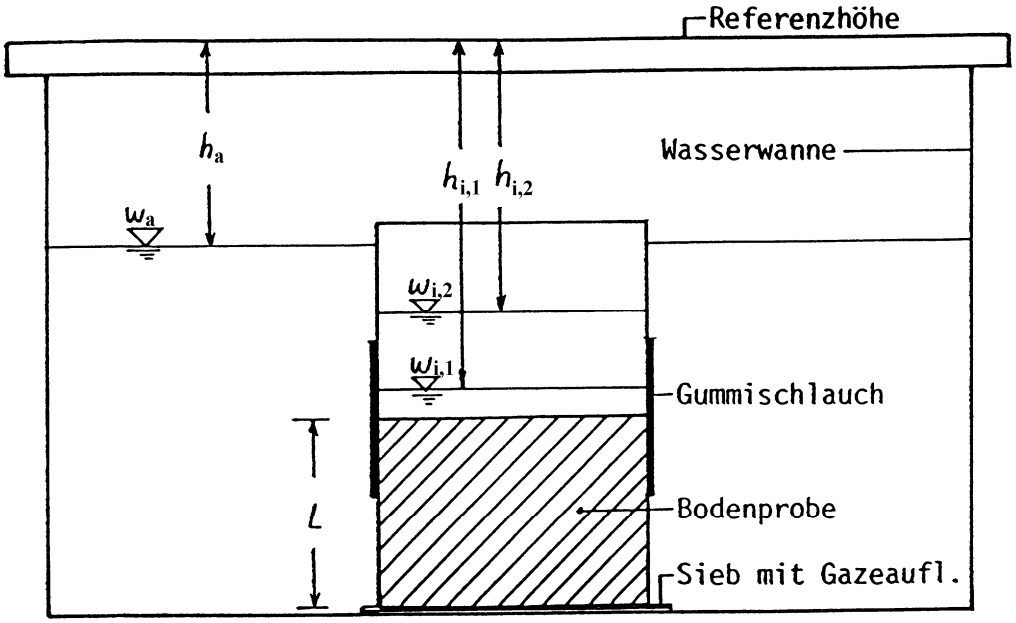


Abbildung 5-1: Versuchsanordnung für die *k*-Wert-Bestimmung im Labor mit aufsteigendem Wasserspiegel

5.2 *k*-Wert-Bestimmung im Feld – Doppelring-Infiltrometer

Diese Methode dient zur Bestimmung des vertikalen *k*-Wertes wenn kein Grundwasserspiegel vorhanden ist oder in großer Tiefe ansteht. Sie besteht aus Messungen der Infiltration von der Geländeoberfläche oder von der Sohle eines verrohrten Bohrloches aus.
An der Bohrlochsohle werden zwei konzentrische Zylinder sorgfältig installiert, mit Wasser gefüllt und der Boden durch Konstanthalten des Wasserspiegels aufgesättigt, bis ein annähernd stationäres Strömungsverhalten erreicht wird.

Der Bodenbereich, dessen Durchlässigkeit mit dem Doppelring-Infiltrometer erfasst wird, kann etwa als Zylinder angegeben werden, dessen Durchmesser etwas größer als der Durchmesser des Innenzylinders ist und dessen Höhe etwa den doppelten Innenzylinderdurchmesser beträgt [Bouwer, 1978]. Der durch diesen Versuch ermittelte *k*-Wert ist vom Makroporenfluss dominiert. Wenn zwei Messungen gleichzeitig durchgeführt werden sollen, ist durch einen ausreichenden Abstand zueinander darauf zu achten, dass sich die beiden Infiltrationsfronten in ihrer horizontalen Ausbreitung nicht gegenseitig behindern.

Der schematische Versuchsaufbau ist in der untenstehenden Abbildung ersichtlich. Am Institut wird jedoch eine wesentlich einfachere Apparatur ohne Messstandrohre verwendet.

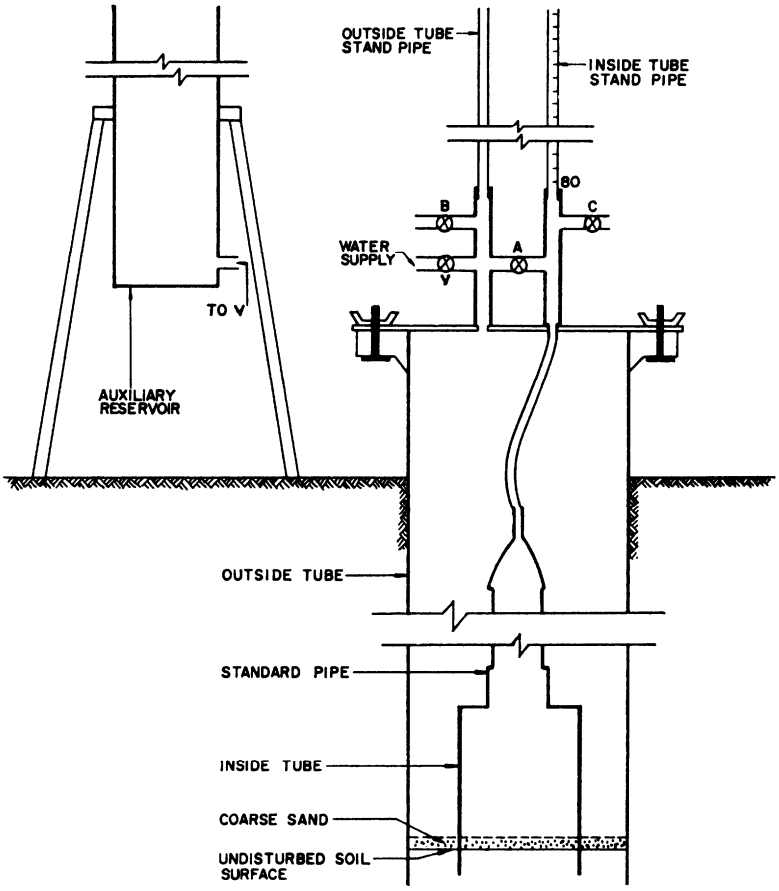


Abbildung 5-2: Schematische Versuchseinrichtung [Boersma, 1965]

Ausrüstung

- zwei Blechzylinder
- Aufsatzkreuz zum gleichmäßigen Eindrücken der Zylinder in den Boden
- Maßstab
- Markierstift
- Stoppuhr
- Wasserkanister
- Schlauchleitung zur Versorgung der beiden Zylinder

Vorbereitung

Es wird ein ausreichend großes horizontales Planum (eventuell Bohrloch) in der gewünschten Tiefe unter der Geländeoberkante ausgehoben und eine möglichst ungestörte horizontale Sohle eingerichtet. Der äußere Zylinder wird auf der Sohle aufgesetzt und ein wenig mit Wasser gefüllt. Sobald der Boden weich ist, wird der Zylinder etwa 5 cm tief eingedrückt bzw. eingeschlagen. Durch sachtes Andrücken an der Innen- und Außenseite ist ein guter Kontakt zwischen Boden und Zylinder herzustellen, damit eine gute Abdichtung erhalten wird und keine Kurzschlussströmung auftritt. Als Schutz der Bodenoberfläche im Zylinder wird noch ein Stück Geotextil eingelegt (alternativ kann eine etwa 1 cm dicke Schicht aus grobem Sand aufgebracht werden).
Bei konstant gehaltenem Wasserspiegel wird nun der Boden gesättigt (Wartezeit etwa eine Stunde bei feinkörnigen Böden). Als Überstauhöhe ist hierbei ein Wert von etwa 3 bis 10 cm zu wählen, wobei einem kleineren Wert der Vorzug zu geben ist (z. B steigt der Wasserverbrauch und die Gefahr des Durchbruches bei gut durchlässigen Böden beträchtlich). Bei der instationären Auswertung sollten jedoch bei der Absenkung bei beiden Messreihen mindestens 10 Messpunkte im Abstand von einem halben Zentimeter erfasst werden, sodass das Niveau des Wasserspiegels für die Aufsättigung und damit der Startwert für die beiden Messreihen mindestens 6 cm über der Bohrlochsohle einzustellen ist. Nach der Aufsättigung wird das Innenrohr zentrisch in das Außenrohr hineingestellt und bei feinkörnigen Böden etwa 2 cm, bei grobkörnigen Böden 3 cm hineingedrückt; die Einschlagtiefe *d* ist zu messen.

5.2.1 Instationärversuch

Der instationäre Versuch besteht aus zwei Messreihen. Die Messgröße ist die zeitliche Absenkung des Wasserspiegels im Innenzylinder während der beiden Messreihen. Bei der ersten Messreihe lässt man den Innenwasserspiegel absinken und hält den äußeren auf dem Ausgangsniveau. Danach wird der Wasserspiegel in beiden Zylindern wieder auf das Ausgangsniveau eingestellt und erneut annähernd stationäre Bedingungen abgewartet. Bei der zweiten Messreihe lässt man den Innen- und den Außenspiegel absinken, wobei man den Außenwasserspiegel durch Wasserzufuhr beständig auf gleicher Höhe wie den Innenwasserspiegel hält.

Versuchsdurchführung

Nachdem der Boden aufgesättigt wurde bzw. annähernd stationäre Verhältnisse erreicht sind, kann mit der ersten der beiden Messreihen begonnen werden. Vorweg ist jedoch die in beiden Zylindern gleich große Wasserspiegelhöhe zu messen.

Nun startet man die Stoppuhr und lässt den Wasserspiegel im Innenrohr bis knapp über dem Boden absinken, während man jenen des Außenrohres konstant hält. Die Absinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels im Innenrohr wird gemessen, indem man die Zeiten bis zum Erreichen von jeweils 0,5 cm Absenkung abliest (alternativ kann die Lage des Wasserspiegels auch mit einem Ultraschall-Sensor permanent erfasst und mit einer Datenerfassung aufgezeichnet werden).
Hierauf wird der Wasserspiegel in beiden Zylindern auf das ursprüngliche Niveau zurückgeführt und mindestens zehnmal so lange konstant gehalten, wie die Absenkung der ersten Messreihe gedauert hat.
Nun wird die Wasserzufuhr zum Innenrohr unterbunden und während der Wasserspiegel darin fällt, wird jener des Außenrohres auf gleicher Höhe mit jenem des Innenrohres gehalten. Erneut wird die Sinkgeschwindigkeit des Wasserspiegels gemessen, bis der Wasserspiegel zum Zeitpunkt t_1 fast das Niveau der Bodenoberfläche erreicht hat.

Hierauf wird der Versuch bzw. werden beide Messreihen wiederholt, wobei vorher wieder der Gleichgewichtszustand herbeizuführen ist, indem man den Wasserspiegel nach der Aufspiegelung auf das ursprüngliche Niveau in beiden Zylindern etwa für die zehnfache Dauer der zweiten Messreihe konstant hält.
Stimmen die Werte der beiden Versuche nicht überein, ist ein dritter Versuch mit beiden Messreihen erforderlich.

Auswertung

Die Ergebnisse beider Messreihen werden auf Millimeterpapier aufgetragen, wobei die Zeit t die Abszisse und das entsprechende Absinken des Wasserspiegels H die Ordinate bedeuten. t wird normalerweise in der Einheit Minuten aufgetragen (bei stark durchlässigen Böden in Sekunden), H in Zentimeter. Nachdem bei der zweiten Messreihe der hydrostatische Druck im äußeren Zylinder kleiner ist als bei der ersten (bei der er konstant dem Ausgangsniveau entsprechen sollte), ist die Abströmung aus dem Innenzylinder weniger durch den Außenzylinder behindert und sollte demnach zu einer schnelleren Absenkung führen. Wenn das nicht der Fall ist, ist eine Auswertung mit den unten stehenden Formeln nicht möglich, weil die realen Bedingungen von den modellhaften maßgeblich abweichen.

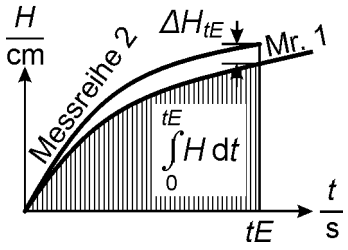


Abbildung 5-3: Graph Zeit t – Absenkung H für beide Messreihen (nach Amoozegar und Warrick, [1986])

Der *k*-Wert errechnet sich nun aus der Beziehung

$$k_{\mathrm{fs}} = \frac{R_{\mathrm{c}}}{F} \cdot \frac{\Delta H_{t\mathrm{E}}}{\int_0^{t\mathrm{E}} H \,\mathrm{d}t}.$$

$[k_{\mathrm{fs}}]$ = cm·min^{-1}· *k*-Wert unter feldgesättigten Bedingungen. Diese Einheit für den *k*-Wert gilt für den Regelfall, wenn für *t* die Einheit min verwendet wird

$[R_{\mathrm{c}}]$ = cm Innenradius des inneren Zylinders

$[F]$ = 1 Geometriebeiwert; $F = f(D, R_{\mathrm{c}}, d)$. *F* ist aus einem der beiden unten stehenden Diagramme zu entnehmen. Falls unterhalb der Schicht, deren *k*-Wert ermittelt werden soll, eine undurchlässige Schicht ansteht, ist Diagramm A zu verwenden, steht eine sehr gut leitende Schicht an, Diagramm B.

$[D]$ = cm Abstand vom Sohlplanum bis zur unteren Grenze der untersuchten Schicht

$[d]$ = cm gemessene Einschlagtiefe des inneren Zylinders in den unzerstörten Boden. Bei feinkörnigen Böden sollte etwa $d = 2$ cm sein, bei grobkörnigen $d = 3$ cm.

$[\Delta H_{t\mathrm{E}}]$ = cm Differenz der Absenkung *H* der beiden Messreihen nach der Absenkdauer t_{E}

$[t_{\mathrm{E}}]$ = min Absenkdauer des Innenwasserspiegels bis zum Erreichen der Endhöhe (mindestens 0,5 cm über dem Boden bzw. der Sandschutzschicht) bei der zweiten Messreihe (bei stark durchlässigen Böden empfiehlt sich die Einheit s)

$[H(t)]$ = cm Absenkung vom Ausgangsniveau nach einer Dauer von *t* Sekunden

$[\int H \,\mathrm{d}t]$ = cm·min Fläche unter der Kurve $H(t)$ von $t = 0$ bis $t = t_{\mathrm{E}}$ der ersten Messreihe mit sinkendem Wasserspiegel im Innenrohr und konstant gehaltenem Wasserspiegel im Außenrohr

Es werden die Verhältnisse d/R_{c} und D/R_{c} berechnet und mit diesen Eingangsparametern der Geometriebeiwert *F* ermittelt, und zwar bei einer undurchlässigen unteren Schicht mit dem Diagramm A und bei einer gut durchlässigen Schicht mit dem Diagramm B.

Pro Versuch wird für beide Messreihen eine Kurve der Relation *t*–*H* gezeichnet. Schließlich wird zum Zeitpunkt t_{E} die Differenz der Absenkungen in den beiden Messreihen $\Delta H_{t\mathrm{E}}$ und das Integral $\int H \,\mathrm{d}t$ der ersten Messreihe von 0 bis t_{E} ermittelt.

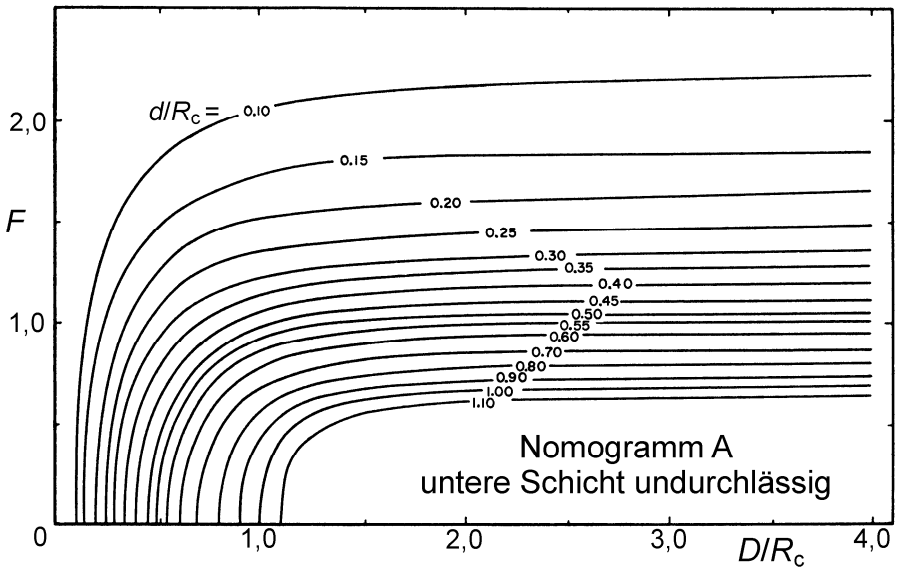


Abbildung 5-4: Diagramm A für die Bestimmung des *F*-Faktors (untere Schicht undurchlässig) [Boersma, 1965]

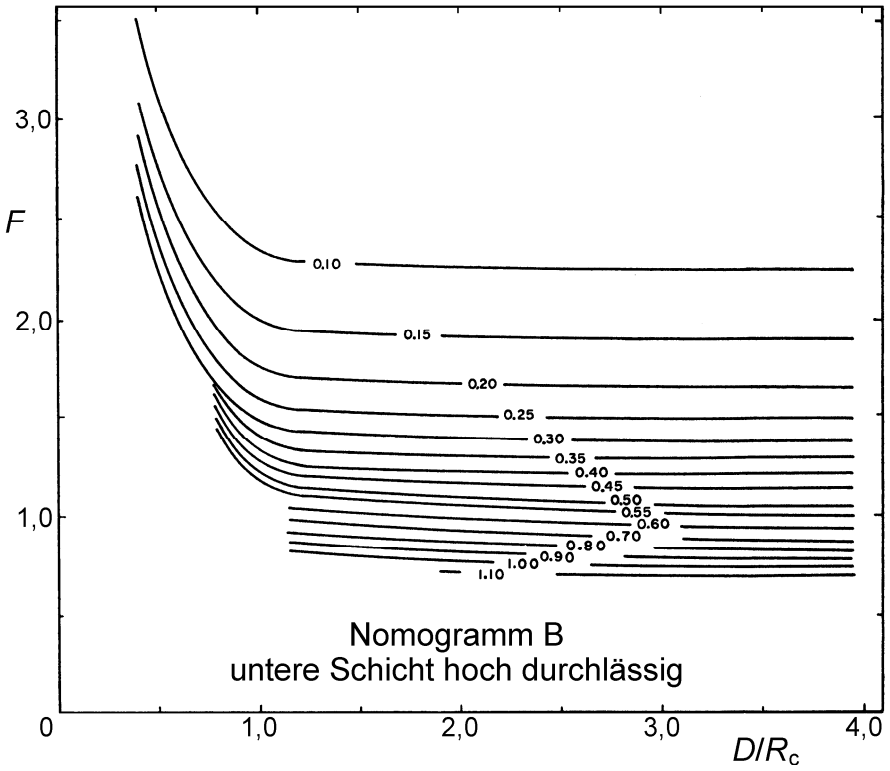


Abbildung 5-5: Diagramm B für die Bestimmung des *F*-Faktors (untere Schicht hoch durchlässig) [Boersma, 1965]

5.2.2 Stationärversuch

Im Gegensatz zum klassischen Verfahren mit instationärer Bewegung und der Erfassung und Auswertung zweier Absenkkurven geht eine neuere Variante des Verfahrens von stationären Verhältnissen aus und erfasst insbesondere die Infiltrationsrate, die durch Konstanthaltung des im Innen- und Außenzylinder gleich hohen Wasserspiegels mit der Zeit quasistationär wird und dann aufgezeichnet wird [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002b].

Auswertung

$$k_{fs} = \frac{q_s}{\frac{H}{(C_1 \cdot d + C_2 \cdot a)} + \frac{1}{\alpha^* \cdot (C_1 \cdot d + C_2 \cdot a)} + 1}$$

$[k_{fs}]$	$= cm \cdot s^{-1}$	Durchlässigkeitsbeiwert bei Feldsättigung. Eine vollständige Sättigung kann unter Feldbedingungen i. A. nicht erzielt werden. Wegen der verbleibenden eingeschlossenen Luftblasen ist k_{fs} daher stets kleiner als der im Labor bei vollständiger Sättigung gemessene k_s-Wert (ganz abgesehen von Inhomogenitäten)
$[q_s]$	$= cm \cdot s^{-1}$	gemessene Infiltrationsrate unter Überstaubedingungen
$[H]$	$= cm$	Überstauhöhe; Höhe des stationären Wasserspiegels sowohl im Innen- als auch im Außenzylinder über der Bodensohle
$[C_1]$	$= 1$	dimensionslose quasi-empirische Konstante, für $d \geq 3$ cm und $H \geq 5$ cm beträgt $C_1 = 0{,}316\,\pi$
$[C_2]$	$= 1$	dimensionslose quasi-empirische Konstante, für $d \geq 3$ cm und $H \geq 5$ cm beträgt $C_2 = 0{,}184\,\pi$
$[d]$	$= cm$	Einschlagtiefe des Innenzylinders in den Boden (der Außenzylinder sollte ein wenig tiefer eingedrückt sein)
$[a]$	$= cm$	Innenradius des Innenzylinders
$[\alpha^*]$	$= cm^{-1}$	makroskopischer Kapillarlängenparameter. α^* drückt die relative Bedeutung der Schwerkraft bezogen auf die Kapillarkraft aus, wobei große Werte von α^* die Dominanz der Schwerkraft über die Kapillarkraft anzeigen. Das trifft insbesondere auf grob texturierte und/oder hochgradig strukturierte Böden zu (siehe Tabelle 5-1) [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002a]. Bemerkenswert ist weiters, dass α^* vom theoretischen Ansatz her ident mit dem Kehrwert der im Infiltrationsmodell nach Green und Ampt auftretenden Größe h_f – der Wasserspannungshöhe direkt an der Infiltrationsfront und im umgebenden trockenen Boden – ist: $\alpha^* = h_f^{-1}$

Diese Gleichung trägt den drei Hauptkomponenten Rechnung, die den quasistationären Fluss von Ring-Infiltrometern bestimmen, nämlich dem Fluss infolge des hydrostatischen Drucks bzw. der Überstauhöhe im Zylinder (erster Term im Nenner der Gleichung), dem ungesättigten Fluss unterhalb und seitlich zu den Zylindern infolge der im Boden herrschenden Kapillarkräfte („Saugspannung“) (zweiter Term im Nenner) und dem reinen Schwerkraftfluss (Gradient 1 bzw. dritter Term). Die laterale Abweichung (Seitwärts- bzw. radiale Komponente der Wasserbewegung) von der Vertikalen wird von den geometrischen Verhältnissen bzw. vom Verhältnis des hydrostatischen Drucks zum Kapillar- oder Tensiometerdruck geprägt und durch den Term $(C_1 \cdot d + C_2 \cdot a)$ ausgedrückt.

Tabelle 5-1: Bodentextur/struktur-Kategorien und zuzuordnender Kapillarlängenparameter α^* [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002a]

Bodentextur- und -struktur-Kategorie	$\alpha^* / \mathrm{cm}^{-1}$
Verdichtete, strukturlose, tonige oder schluffige Substrate. Diese Kategorie trifft oftmals auf Deponieabdeck- oder -dichtungsschichten, limnische oder marine Sedimente zu	0,01
Böden, die sowohl fein texturiert (tonig oder schluffig) als auch unstrukturiert sind; können auch einen gewissen Feinsand-Anteil aufweisen	0,04
Die meisten strukturierten Böden von Tonen bis zu Lehmen, einschließlich unstrukturierten mittleren und feinen Sanden. Diese Kategorie trifft für die meisten landwirtschaftlich genutzten Böden zu	0,12
Grobsande und kiesige Sande; einschließlich stark strukturierte oder aggregierte Böden als auch Böden mit großen und/oder zahlreichen Rissen oder Makroporen	0,36

5.3 Guelph-Permeameter

Das Guelph-Permeameter ist eine Apparatur, die zur Bestimmung der feldgesättigten hydraulischen Leitfähigkeit bzw. des k_{fs}-Wertes, aber auch des Matrixflusspotenzials dient. Zu diesem Zweck wird im ungestörten Boden sorgfältig ein nicht allzu tiefes Bohrloch errichtet, die Apparatur aufgestellt, die Wasserzufuhr geöffnet und der Wasserspiegel konstant gehalten. Gemessen wird vom Beginn der Wasserzufuhr an das je Zeitintervall infiltrierende Wasservolumen. Für eine genauere Auswertung sind ähnlich wie beim Doppelring-Infiltrometer zwei Messreihen erforderlich. Die Messung dauert für gewöhnlich nicht länger als eine Stunde.

Apparatur

Das Guelph-Permeameter besteht aus folgenden, im Transportkoffer befindlichen Teilen:
- Wasserreservoir-Einheit mit Reservoirhalterung, Reservoirkopf und mittlerem Luftrohr
- Versorgungsrohr mit unterem Luftrohr
- oberes Luftrohr mit Wassertiefenanzeiger und Skalenrohr
- Dreibeinkopf mit Halterungsmanschette
- drei Fußrohre des Dreibeins
- Bohrgestänge
- Flügelbohrer
- Sohlbohrer
- Bohrlochbürste
- Kanister
- Handvakuumpumpe

Bohrlochherstellung

Der Tiefenbereich, in dem mit der Standardausrüstung des Guelph-Permeameters gemessen werden kann, beträgt 15 cm bis 75 cm. Darauf ist auch die Bohrausrüstung abgestimmt. Soll die Durchlässigkeit tiefer liegender Schichten erfasst werden, muss vorerst z. B. mit einem Löffelbagger eine Plattform in der entsprechenden Tiefe ausgehoben werden. Von dieser Plattform aus erfolgt das Bohren des Lochs mit dem Flügelbohrer. Die letzten 15 cm – eventuell auch weniger – sind mit dem Sohlbohrer zu graben, mit dem die Bohrlochwand und die Sohle besonders genau geformt werden können. In den meisten Böden wird durch den Bohrvorgang die Bohrlochwand verschmiert, besonders bei höherem Wassergehalt. Diese Schmierschicht kann mit der Bohrlochbürste durchbrochen werden. Der Außendurchmesser der Bürste ist geringfügig größer als der Bohrlochdurchmesser. Beim Absenken im Bohrloch bis zur Sohle streifen die Borsten ganz leicht an der Bohrlochwand und neigen sich zum Stab, beim anschließenden Ziehen stellen sich die Borsten auf und bohren sich in die Bohrlochwand, die dadurch perforiert wird. Dies sollte nicht öfter als ein- bis zweimal gemacht werden, weil dabei Partikel gelockert werden könnten und auf die Sohle fallen könnten.

Montage der Ausrüstung

Man beginnt den Zusammenbau mit dem Dreibeinkopf, in dem die drei Fußrohre eingesteckt werden. Um die Aufstellung im Gelände zu erleichtern, ist das Dreibeinstativ nicht starr, sondern elastisch. Zur Erhöhung der Stabilität ist daher die Zugkette entsprechend zu adjustieren.
Die Reservoir-Einheit mit dem mittleren Luftrohr und das untere Luftrohr (befindet sich im Versorgungsrohr) werden aus dem Koffer genommen. Die beiden Luftrohre werden mit Hilfe des Verbindungsstückes zusammengefügt, wobei das Rohrende des unteren Luftrohres soweit in das Verbindungsstück hineinzuschieben ist, bis die Noppen des Verbindungsstückes in der Vertiefung bzw. Einkerbung am Rohr einrasten.
Die Halterungsmanschette wird – mit dem breiteren Ende nach oben – etwa über die halbe Länge des Versorgungsrohres geschoben und das Versorgungsrohr über das untere Luftrohr geschoben, bis es schließlich in der Reservoirhalterung fest sitzt und eine wasserdichte Verbindung hergestellt ist.
Die Reservoir-Einheit mit dem Versorgungsrohr kann nun auf das Dreibein aufgesetzt werden, wobei sie auf der Halterungsmanschette bzw. dem Dreibeinkopf ruht.
Das obere Luftrohr mit dem (ein wenig hinaufgeschobenen) Wassertiefenanzeiger wird mit dem mittleren Luftrohr verbunden und das gesamte Luftrohr nach unten geschoben, sodass die Ventilspitze des Luftrohres die Öffnung im Kopf des Versorgungsrohres dicht verschließt. Der Wassertiefenanzeiger ist nach unten zu schieben, bis er am Reservoirkopf ansteht. Schließlich wird das Skalenrohr übergestülpt und auf den entsprechenden Sitz am Reservoirkopf aufgeschoben.
Nun ist darauf zu achten, dass die Schlauchklemme am Reservoirkopf dicht schließt; der Stopfen ist herauszuziehen. Der Ventilknopf an der Reservoirhalterung ist so zu drehen, dass die Kerbe nach oben weist. Dann ist die Verbindung zwischen den beiden Vorratsbehältern freigegeben und es kann begonnen werden, Wasser am Reservoirkopf einzufüllen. Dazu kann der Kanister mit dem Schlauch verwendet werden, wobei der wassergefüllte Kanister einfach auf den Boden gestellt wird. Das Schlauchende wird nun in die Rinne am Reservoirkopf gehalten und der Kanister durch sanften Fußdruck bzw. durch das Körpergewicht unter Druck gesetzt, sodass das Wasser aus dem Schlauch austritt und über die Rinne und die Reservoirkopföffnung in den Vorratsbehälter strömt. Die innen befindliche Luft muss dabei nach oben entweichen können. Die beiden Vorratsbehälter sind vollständig zu füllen, bis keine Luftblasen mehr aufsteigen und sich in der Rinne am Reservoirkopf ein freier Wasserspiegel ausgebildet hat. Nach der Füllung ist der Stopfen wieder zu verschließen.
Die Reservoireinheit ist vom Dreibeinstativ wieder abzuheben und die Halterungsmanschette ist ganz nach oben zu schieben. Bei seichten Bohrlöchern wird nun das Dreibeinstativ über dem Bohrloch aufgestellt und die Reservoir-Einheit samt Versorgungsrohr vorsichtig im Dreibeinkopf und im Bohrloch eingeführt und mit der Spitze auf der Bohrlochsohle aufgesetzt. Nun schiebt man die Halterungsmanschette nach unten, bis sie auf dem Dreibeinkopf aufsitzt. Bei tieferen Bohrlöchern verzichtet man auf das Stativ und senkt das Versorgungsrohr direkt im Bohrloch ab, bis es mit der Spitze auf der Bohrlochsohle aufsteht. Hernach schiebt man die Halterungsmanschette vorsichtig so weit nach unten, dass sie in das Bohrloch hineinragt und das Gerät an der Bohrlochwand abstützt.

Messung

Die Messung erfolgt standardgemäß in zwei Messreihen. Mit der ersten Messreihe beginnend, wird das Luftrohr langsam gezogen, sodass die Ventilspitze die Versorgungsrohröffnung frei gibt, die an

der Ventilspitze aus dem Luftrohr austretenden Luftblasen im Versorgungsrohr aufsteigen können und Wasser langsam austritt, ohne die Bohrlochoberfläche zu verschlämmen. Die erste einzustellende Wassertiefe, die an der Unterkante des Wassertiefenanzeigers bzw. am Skalenrohr abgelesen werden kann, beträgt im Regelfall $H_1 = 5$ cm. Sobald das Luftrohr bis zu dieser gewünschten Höhe gezogen worden ist, beginnt man mit der Messung, wobei man entweder in konstanten Zeitintervallen die Volumsabnahme im Vorratsbehälter an der mm-Teilung am Innenzylinder des Reservoirs ablesen oder die Zeitintervalle für konstante Volumina bzw. Wasserspiegelabsenkungen im Reservoir messen kann. Das im Zeitintervall ausströmende Volumen in cm^3 ergibt sich aus der am Gerät vermerkten Zellkonstanten X – der Querschnittsfläche beider Reservoirzylinder in cm^2 – mal der abgelesenen Wasserspiegeldifferenz in cm.
Stellt man fest, dass die Wasserzufuhr bzw. der Fluss sehr langsam vor sich geht (es steigen wenig bis gar keine Luftblasen auf), kann die Wasserzufuhr aus dem Außenzylinder der Reservoireinheit durch Drehen des Ventilknopfes an der Reservoirhalterung bis die Kerbe nach unten zeigt unterbunden werden (Anmerkung im Messprotokoll!). Zur Berechnung des ausgetretenen Volumens ist dann die Zellkonstante für den Innenzylinder zu verwenden, die mit Y bezeichnet ist.
Die Messreihe wird beendet, nachdem der Stationärzustand bzw. eine annähernd konstante Ausströmgeschwindigkeit (Absenkrate q) erreicht worden ist. Dafür sollten drei hintereinander folgende Zeitabstände für gleiche Absenkungen bzw. drei abgelesene Absenkungen für konstante Zeitabstände keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Anschließend wird die zweite Messreihe durchgeführt, für die im Standardfall die Wassertiefe $H_2 = 10$ cm eingestellt wird. Das Luftrohr ist wieder ausreichend langsam zu ziehen, um Verschlämmungen bzw. Aufwirbelungen von Bodenpartikeln durch die Aufspiegelung hintanzuhalten. Erneut ist nach dem Erreichen der gewünschten Wassertiefe die Absenkung im Reservoir zu messen und die Messung so lange durchzuführen, bis die Fließrate annähernd konstant ist.

<u>Auswertung unter Standardbedingungen</u>

Bei den durch die Standard-Bohrausrüstung ($R = 3{,}0$ cm) und die zwei eingestellten Standardwassertiefen $H_1 = 5$ cm bzw. $H_2 = 10$ cm vorliegenden geometrischen Gegebenheiten ist die Form der sich ausbreitenden Infiltrationsfront relativ unabhängig von den sonstigen hydraulischen Bedingungen im Boden. Der k_{fs}-Wert hängt dann fast nur von den beiden quasistationären Abströmraten ab und man kann die einfachen Formeln aus der Gebrauchsanleitung [SoilMoisture Equipment Corp., 1986] benutzen:

$$\frac{k_{fs}}{cm \cdot s^{-1}} = 0{,}0041 \times \frac{A_{Res}}{cm^2} \cdot \frac{q_2}{cm \cdot s^{-1}} - 0{,}0054 \times \frac{A_{Res}}{cm^2} \cdot \frac{q_1}{cm \cdot s^{-1}} \qquad (5\text{-}1a)$$

$$\frac{\phi_m}{cm^2 \cdot s^{-1}} = 0{,}0572 \times \frac{A_{Res}}{cm^2} \cdot \frac{q_1}{cm \cdot s^{-1}} - 0{,}0237 \times \frac{A_{Res}}{cm^2} \cdot \frac{q_2}{cm \cdot s^{-1}} \qquad (5\text{-}1b)$$

$[k_{fs}] = cm \cdot s^{-1}$ Durchlässigkeitsbeiwert unter feldgesättigten Bedingungen. Die beiden Konstanten in der Gleichung für k_{fs} besitzen die Dimension L^{-2} bzw. die Einheit cm^{-2}.
Bei negativem Ergebnis für k_{fs} siehe Seite 58!

$[\phi_m]$ $= cm^2 \cdot s^{-1}$ Matrixflusspotenzial. Die beiden Konstanten in der Gleichung für ϕ_m besitzen die Dimension L^{-3} bzw. die Einheit cm^{-3}.Bei negativem Ergebnis für ϕ_m siehe Seite 58!

$[A_{Res}]$ $= cm^2$ Querschnittsfläche des im Reservoir absinkenden Wasservolumens, als Zellkonstante bezeichnet.

Kerbe des Ventilknopfes oben – Zellkonstante X: $A_{Res} = X$
Abstrom aus beiden Reservoirs, X entspricht der Summe der beiden Kreisringflächen Luftrohr – Innenzylinder und Innenzylinder – Außenzylinder;
für das Gerät mit der
Seriennummer 10793 $X = 35{,}13\ cm^2$ (Besitzer: IHLW)
Seriennummer 10295 $X = 35{,}34\ cm^2$

Kerbe des Ventilknopfes unten – Zellkonstante Y: $A_{Res} = Y$
nur Innenzylinder geöffnet; Y entspricht der Kreisringfläche Luftrohr-Außenradius – Innenzylinder-Innenradius; für das Gerät mit der
Seriennummer 10793 $Y = 2{,}15\ cm^2$ (Besitzer: IHLW)
Seriennummer 10295 $Y = 2{,}16\ cm^2$

$[q_1]$ $= cm \cdot s^{-1}$ quasistationäre Fließ- oder Absenkrate; entweder Mittel aus den letzten drei, annähernd konstanten Absenkungen der ersten Messreihe dividiert durch das festgelegte Zeitintervall oder festgelegte Absenkung dividiert durch das Mittel der letzten drei Zeitintervalle:
q = Wasserspiegeldifferenz Δs in cm / Zeitdifferenz Δt in s
Wenn z. B. das Zeitintervall mit $\Delta t = 120$ s festgelegt wurde und die letzten 4 Ablesungen 56,5 cm, 55,9 cm, 55,4 cm und 54,8 cm und damit die Absenkungen Δs 0,6 cm, 0,5 cm, 0,6 cm und 0,6 cm betragen, kann die Strömung als quasistationär mit $\Delta s = 0{,}6$ cm erachtet werden. Als quasistationäre Absenkrate ist dann $q = 0{,}6 / 120 = 0{,}0050$ cm/s anzusetzen.

$[q_2]$ $= cm \cdot s^{-1}$ quasistationäre Absenkrate der zweiten Messreihe

Bei negativen Ergebnissen für den Durchlässigkeitsbeiwert oder das Matrixflusspotenzial sind die beiden Messreihen getrennt auszuwerten. Näheres hierzu siehe S. 58.

Theorie und Auswertung bei beliebigen Werten für R, H_1 oder H_2

Während die quasistationäre Abströmung über die Bohrlochsohle überwiegend von der Schwerkraft getrieben wird, erfolgt sie seitlich fast nur durch die außerhalb der Infiltrationsfront vorherrschenden Wasserspannung $h_i(\theta_i)$. Je größer das Verhältnis H/R ist, desto größer ist auch das Verhältnis der Abströmung über die Bohrlochwand zur Abströmung über die Bohrlochsohle und die Form der sich ausbreitenden Infiltrationsfront weicht immer mehr von der unter Standardbedingungen ab. Das ist auf den stärkeren Einfluss von h_i und von den hydraulischen Eigenschaften des Bodens für die ungesättigte Wasserbewegung zurückzuführen, dem pauschal durch einen bodenabhängigen Formfaktor C (engl. *shape factor*) Rechnung getragen wird. Nach Reynolds und Elrick [2002] soll dieser den geometrie- und den bodenabhängigen Beitrag der horizontalen Ausbreitung der Infiltrationsfront zum gesamten Fluss aus dem Bohrloch berücksichtigen, wobei die Abhängigkeit von der Geometrie viel stärker ausgeprägt ist als jene von den restlichen Einflussgrößen.

Der derzeitige Standardansatz zur Auswertung der Methode unter allgemeineren Bedingungen stammt von Reynolds und Elrick [1985] und gilt unter folgenden Annahmen:
- die Formel gilt erst ab Erreichen eines annähernd stationären Fließzustandes
- das poröse Medium ist homogen, isotrop und starr und

– es liegt ein unendlicher rotationssymmetrischer Halbraum vor, an dessen äußerem Rand beständig das Matrixpotenzial h_m herrscht.

Für diese Bedingungen geben die beiden Autoren folgende Beziehung an:

$$Q = \frac{2\pi \cdot H^2}{C} \cdot k_{fs} + \pi \cdot R^2 \cdot k_{fs} + \frac{2\pi \cdot H}{C} \cdot \phi_m \qquad (5\text{-}2)$$

$[Q]$ = $m^3 \cdot s^{-1}$ quasistationärer Fluss; $Q = q \cdot A_{Res}$

$[H]$ = m Wassertiefe im Bohrloch

$[C]$ = 1 Formfaktor, primär vom Verhältnis H/R bzw. der Geometrie und sekundär von bestimmten Bodenbedingungen abhängig. Der C-Faktor wird aus dem Diagramm (Fig. 45) der Gebrauchsanleitung [SoilMoisture Equipment Corp., 1986] bzw. der Abbildung 5-6 entnommen

$[k_{fs}]$ = $m \cdot s^{-1}$ Durchlässigkeitsbeiwert unter feldgesättigten Bedingungen

$[R]$ = m Bohrlochradius; bei der Standard-GPM-Ausrüstung ist R = 3,0 cm

$[\phi_m]$ = $m^2 \cdot s^{-1}$ Matrixflusspotenzial; definiert als $\phi_m = \int_{h_{m0}}^{0} k(h_m)\, dh_m$

Die Bezeichnung „Matrixflusspotenzial“ wird von W. R. Gardner bereits 1958 verwendet. ϕ_m als Integral der Beziehung $k(h_m)$ – in der Mathematik unter der Bezeichnung Kirchhoff-Transformation bekannt – ist eine für die numerische Beschreibung des Infiltrationsvorganges vorteilhafte Größe [Elrick und Reynolds, 1992]

$[h_m]$ = m Matrixpotenzialhöhe (= Tensiometerpotenzialhöhe, sofern der Porenluftdruck gleich dem atmosphärischen Luftruck ist)

$[h_{m0}]$ = m Matrixpotenzialhöhe, die zu Beginn des Versuchs im gesamten Boden herrschte und nach Erreichen des annähernden Stationärzustandes außerhalb des Aufsättigungsbereichs noch immer vorliegt

Während die ersten beiden Terme auf der rechten Seite der Formel 5-2 den gesättigten Fluss aufgrund der Schwerkraft und der Wassertiefe H beschreiben, charakterisiert der dritte den ungesättigten Fluss mittels der charakteristischen Größe des Matrixflusspotenzials ϕ_m. Allerdings beinhaltet die Gleichung dadurch zwei Unbekannte – nämlich k_{fs} und ϕ_m –, sodass zur Auswertung eben zwei Messreihen mit unterschiedlicher Wassertiefe im Bohrloch erforderlich sind.

Setzt man die Formel 5-2 mit H_1, C_1 und Q_1 für die Messreihe 1 und H_2, C_2 und Q_2 für die Messreihe 2 an

$$\left(\frac{2\pi \cdot H_1^{\,2}}{C_1} + \pi \cdot R^2\right) \cdot k_{fs} + \frac{2\pi \cdot H_1}{C_1} \cdot \phi_m = Q_1 \qquad (5\text{-}3a)$$

$$\left(\frac{2\pi \cdot H_2^{\,2}}{C_2} + \pi \cdot R^2\right) \cdot k_{fs} + \frac{2\pi \cdot H_2}{C_2} \cdot \phi_m = Q_2\,, \qquad (5\text{-}3b)$$

eliminiert von den beiden Unbekannten k_{fs} und ϕ_m die letztere und löst die durch Subtraktion der Gl. 5-3a von Gl. 5-3b entstehende Gleichung nach k_{fs} auf, erhält man

$$k_{fs} = \frac{Q_2 \cdot \frac{2\pi \cdot H_1}{C_1} - Q_1 \cdot \frac{2\pi \cdot H_2}{C_2}}{\left(\frac{2\pi \cdot H_2^{\,2}}{C_2} + \pi \cdot R^2\right) \cdot \frac{2\pi \cdot H_1}{C_1} - \left(\frac{2\pi \cdot H_1^{\,2}}{C_1} + \pi \cdot R^2\right) \cdot \frac{2\pi \cdot H_2}{C_2}}$$

$$k_{fs} = \frac{Q_2 \cdot H_1 \cdot C_2}{\pi \cdot \left[2H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)\right]} - \frac{Q_1 \cdot H_2 \cdot C_1}{\pi \cdot \left[2H_1 \cdot \mathrm{H}_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)\right]}$$

Zur einfacheren Darstellung treffen wir gemäß der Gebrauchsanleitung die Zuordnung

$$G_2 = \frac{H_1 \cdot C_2}{\pi \cdot \left(2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)\right)}$$

und
$$G_1 = G_2 \cdot \frac{H_2 \cdot C_1}{H_1 \cdot C_2} = \frac{H_2 \cdot C_1}{\pi \cdot \left(2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)\right)}$$

und können nun schreiben $\boxed{k_{fs} = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1}$. (5-4a)

$[Q_1]$ = $m^3 \cdot s^{-1}$ quasistationärer Fluss für die erste Messreihe
$[Q_2]$ = $m^3 \cdot s^{-1}$ quasistationärer Fluss für die zweite Messreihe
$[H_1]$ = m Wassertiefe im Bohrloch während der ersten Messreihe
$[H_2]$ = m Wassertiefe im Bohrloch während der zweiten Messreihe
$[C_1]$ = 1 Formfaktor für die erste Messreihe
$[C_2]$ = 1 Formfaktor für die zweite Messreihe

Der Fluss lässt sich errechnen aus $Q = q \cdot A_{Res}$.

$[q]$ = $m \cdot s^{-1}$ quasistationäre Fließ- oder Absenkrate (Mittel aus den letzten drei annähernd konstanten Absenkungen dividiert durch das festgelegte Zeitintervall oder festgelegte Absenkung dividiert durch das Mittel aus den letzten drei Zeitintervallen)

$[A_{Res}]$ = cm^2 Querschnittsfläche des im Reservoir absinkenden Wasservolumens, als Zellkonstante bezeichnet.

Kerbe des Ventilknopfes oben – Zellkonstante X: $A_{Res} = X$
Abstrom aus beiden Reservoirs, X entspricht der Summe der beiden Kreisringflächen Luftrohr – Innenzylinder und Innenzylinder – Außenzylinder;
für das Gerät mit der
Seriennummer 10793 $X = 35{,}13\ cm^2$ (Besitzer: IHLW)
Seriennummer 10295 $X = 35{,}34\ cm^2$

Kerbe des Ventilknopfes unten – Zellkonstante Y: $A_{Res} = Y$
nur Innenzylinder geöffnet; Y entspricht der Kreisringfläche Luftrohr-Außenradius – Innenzylinder-Innenradius; für das Gerät mit der
Seriennummer 10793 $Y = 2{,}15\ cm^2$ (Besitzer: IHLW)
Seriennummer 10295 $Y = 2{,}16\ cm^2$

Für das Matrixflusspotenzial ϕ_m liefert das System aus den zwei Gleichungen 5-3a und 5-3b

$$\phi_m = J_1 \cdot Q_1 - J_2 \cdot Q_2 \qquad (5\text{-}4b)$$

mit
$$J_1 = \frac{(2\,H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1}{2\,\pi \cdot \left(2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)\right)}$$

und
$$J_2 = J_1 \cdot \frac{(2\,H_1^2 + R^2 \cdot C_1) \cdot C_2}{(2\,H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1} = \frac{(2\,H_1^2 + R^2 \cdot C_1) \cdot C_2}{2\,\pi \cdot \left(2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)\right)}.$$

Unter Standardbedingungen ist $R = 3$ cm, $H_1 = 5$ cm und $H_2 = 10$ cm. Setzt man die Verhältnisse $H_1/R = 5{,}0/3{,}0 = 1{,}67$ und $H_2/R = 10{,}0/3{,}0 = 3{,}33$ in das Diagramm für den Formfaktor C ein, erkennt man, dass C_1 praktisch unabhängig von den Bodenbedingungen ist und auch C_2 kaum variiert. Die beiden Größen können daher unter Standardbedingungen konstant angesetzt werden. Eine mathematische Analyse ergab, dass man für die Koeffizienten G_2, G_1, J_1 und J_2 genau dann die in den Gleichungen 5-1a und 5-1b ausgewiesenen Konstanten unter Standardbedingungen erhält, wenn man für $C_1 = 0{,}821$ und für $C_2 = 1{,}25$ einsetzt.

Formfaktor *C*

In Fig. 45 der Gebrauchsanleitung [SoilMoisture Equipment Corp., 1986] bzw. in der Abbildung 5-6 wird die Abhängigkeit des Faktors *C* von gewissen Bodenbedingungen (Eigenschaftsparametern und Anfangsbedingungen) durch drei Kurven ausgedrückt. Diese Idee dürfte von Reynolds und Elrick [1987] stammen (wurde aber möglicherweise schon 1986 im Journal „Ground Water Monitoring Review" von den beiden publiziert), die für drei ausgewählte Bodenbedingungen das Verhältnis H/R variiert und aus numerischen Simulationen und Rückrechnungen die zugehörigen *C*-Werte bestimmt haben. Die so gewonnenen Wertepaare aus H/R und *C* wurden jeweils durch einen Kurvenzug verbunden. Zhang, Groenevelt und Parkin [1998] passten an die drei Kurven folgende mathematische Funktionen an:

$$C = [H/(2{,}074\,R + 0{,}093\,H)]^{0{,}754} \qquad \text{für } \alpha^* \geq 0{,}09\,\text{cm}^{-1} \qquad \text{(5-5a)}$$

$$C = [H/(1{,}992\,R + 0{,}091\,H)]^{0{,}683} \qquad \text{für } \alpha^* = 0{,}04\,\text{cm}^{-1} \qquad \text{(b)}$$

$$C = [H/(2{,}102\,R + 0{,}118\,H)]^{0{,}655} \qquad \text{für } \alpha^* = 0{,}01\,\text{cm}^{-1} \qquad \text{(c)}$$

$[\alpha^*] = \text{cm}^{-1}$ makroskopischer Kapillarlängenparameter. α^* drückt die relative Bedeutung der Schwerkraft bezogen auf die Kapillarkraft aus, wobei große Werte von α^* die Dominanz der Schwerkraft über die Kapillarkraft anzeigen. Das trifft insbesondere auf grob texturierte und/oder hochgradig strukturierte Böden zu (siehe Tabelle 5-1) [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002a].
Meist gilt $0{,}01 \leq \alpha^*/\text{cm}^{-1} \leq 0{,}5$.
α^* ist vom theoretischen Ansatz her ident mit dem Kehrwert der im Infiltrationsmodell nach Green und Ampt auftretenden effektiven Wasserspannungshöhe h_f (Differenz der beiden Wasserspannungen direkt an der Infiltrationsfront und im umgebenden trockenen Boden): $\alpha^* = h_f^{-1}$ $(h_f \geq 0)$
Ein enger Zusammenhang besteht bei vielen Böden auch mit der Lufteintrittshöhe $\alpha^* = h_f^{-1} = 2\,h_a$ $(h_a \geq 0)$.

Setzt man an Stelle der drei numerischen Konstanten in den drei Funktionsgleichungen 5-5a bis c von Zhang, Groenevelt und Parkin drei Koeffizienten a_0, a_1 und a_2, erhält man als verallgemeinerte Funktion

$$(H/R) = \left(\frac{H/R}{a_0 + a_1 \cdot H/R}\right)^{a_2}$$

mit den Koeffizientenwerten für die drei unterschiedlichen Bodenbedingungen, die durch den makroskopischen Kapillarlängenparameter ausgedrückt werden

Funktion	a_0	a_1	a_2	für die Bodenbedingung
a	2,074	0,093	0,754	$\alpha^* \geq 0{,}09\,\text{cm}^{-1}$
b	1,992	0,091	0,683	$\alpha^* = 0{,}04\,\text{cm}^{-1}$
c	2,102	0,118	0,655	$\alpha^* = 0{,}01\,\text{cm}^{-1}$

Wertepaare der drei Funktionen sind im Arbeitsblatt „Ermittlung des *C*-Faktors" auf S. 63 zu finden. Der Gültigkeitsbereich dieser Beziehungen hinsichtlich der geometrischen Größen ist durch die Ungleichungen $1\,\text{cm} \leq R \leq 5\,\text{cm}$, $0{,}5\,\text{cm} \leq H \leq 20\,\text{cm}$ und $0{,}25 \leq H/R \leq 20$ eingeschränkt. Wichtig ist der Verweis von Reynolds und Elrick [2002], dass die beiden letzten Kategorien der Tabelle 5-1 durch die Funktion 5-5a abgedeckt sind (daher auch der Gültigkeitsbereich $\alpha^* \geq 0{,}09\,\text{cm}^{-1}$ – und nicht $0{,}12\,\text{cm}^{-1}$) und dies die bevorzugte Funktion für die meisten natürlichen Bodentexturen und -strukturen ist. Der Kategorisierung in Tabelle 5-1 ist generell der Vorzug gegenüber der Legende in der Fig. 45 [SoilMoisture Equipment Corp., 1986] einzuräumen.

Bemerkenswert ist, dass Reynolds und Elrick [2002] die Zuordnung der drei Funktionsgleichungen zu den in der Gebrauchsanleitung [SoilMoisture Equipment Corp., 1986] angeführten drei „Soil Types“ (siehe Abbildung 5-6) vermeiden, obwohl der Funktionsverlauf von 5-5a praktisch ident mit dem des Soil Type 1 ist, der von 5-5b mit dem des Soil Type 2 und die Kurve c mit dem Typ 3. Während jedoch die Funktion 5-5a für $\alpha^* \geq 0{,}12\,\mathrm{cm}^{-1}$ und damit laut Tabelle 5-1 für folgende Böden zutrifft: die meisten strukturierten Böden von Tonen bis zu Lehmen, einschließlich unstrukturierten mittleren und feinen Sanden, die meisten landwirtschaftlich genutzten Böden, Grobsande und kiesige Sande; einschließlich stark strukturierte oder aggregierte Böden als auch Böden mit großen und/oder zahlreichen Rissen oder Makroporen –, sind dem Soil Type 1 „Sands“ zugeordnet. Reynolds und Elrick [2002] bezeichnen diese Kategorie als den Standard, laut Gebrauchsanleitung hingegen sind die meisten landwirtschaftlich genutzten Böden wohl eher dem Soil Type 2 – „Structured Loams and Clays“ – zuzuordnen. Bei den Kategorien b und c bzw. den Soil Types 2 und 3 sind die Unterschiede weniger ausgeprägt. Die genannten Differenzen sind wohl auf die zeitliche Entwicklung zurückzuführen. Fig. 6 von Reynolds und Elrick [1987] enthält die drei Böden „Sand“ mit $\alpha^* \geq 0{,}25\,\mathrm{cm}^{-1}$, „Guelph Loam“ mit $\alpha^* \geq 0{,}336\,\mathrm{cm}^{-1}$ und „unstructured clay“ mit $\alpha^* \geq 0{,}001\,\mathrm{cm}^{-1}$. In der Legende zu Fig. 45 der Gebrauchsanleitung werden die drei Soil Types „Sands“, „Structured loams and clays“ und „unstructured clays“ genannt, aber keine α^*-Werte spezifiziert. Die Legende zu Fig. 3.4-13 von Reynolds und Elrick [2002] enthält nur α^*-Werte für die drei Kurven (0,12, 0,04 und 0,01 cm^{-1}), aber keine sonstigen Bodenbezeichnungen.

Tabelle 5-1 liefert nur einen groben Anhaltspunkt für den Wert des makroskopischen Kapillarlängenparameters α^*. Viel genauer kann er laut seiner Definition aus dem Verhältnis $k_{\mathrm{fs}}/\phi_{\mathrm{m}}$ errechnet werden [Reynolds und Elrick, 2002]:

$$\alpha^* = \frac{k_{\mathrm{fs}}}{\phi_{\mathrm{m}}}. \qquad (5\text{-}6)$$

Daraus folgt, dass man die Tabelle 5-1 als erste Schätzung für α^* und provisorische Ermittlung von C heranziehen kann, mit dem provisorischen C-Faktor die provisorischen Werte für k_{fs} und ϕ_{m} zu berechnen sind; um schließlich mit einem verbesserten Wert $\alpha^* = k_{\mathrm{fs}}/\phi_{\mathrm{m}}$ einen genaueren Wert für C sowie die endgültigen Werte k_{fs} und ϕ_{m} zu ermitteln. Diese Überlegung ist unter Standardbedingungen selbstverständlich hinfällig (siehe S. 55).

Wenn der Wasseranteil des Bodens θ bekannt ist oder einfach geschätzt wird, kann man auch die ***Sorptivität*** aus folgender Gleichung berechnen [SoilMoisture Equipment Corp., 1986]:

$$S = \sqrt{2\,\Delta\theta \cdot \phi_{\mathrm{m}}}$$

$[S]$	$= \mathrm{cm \cdot s^{-1/2}}$	Sorptivität
$[\Delta\theta]$	$= 1$	Differenz zwischen dem gesättigten Wasseranteil θ_{s} und dem Anfangswasseranteil (Wasseranteil zu Beginn des Versuchs θ_{i}): $\Delta\theta = \theta_{\mathrm{s}} - \theta_{\mathrm{i}}$
$[\phi_{\mathrm{m}}]$	$= \mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$	Matrixflusspotenzial; definiert als $\phi_{\mathrm{m}}(h_{\mathrm{m}}) = \int_{h_{\mathrm{i}}}^{h_{\mathrm{m}}} k\,\mathrm{d}h_{\mathrm{m}}$ – konkreter wohl durch $\phi_{\mathrm{m}} = \int_{h_{\mathrm{i}}}^{1/\alpha^*} k\,\mathrm{d}h_{\mathrm{m}}$ anzugeben.

Wenn das kapillare Leitvermögen $k(h)$ modelliert werden soll und hierzu eine Exponentialfunktion

$$k(h) = k_{\mathrm{s}} \cdot \mathrm{e}^{\alpha \cdot h}$$

$[k(h)]$	$= \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$	kapillares Leitvermögen (als Funktion des Matrixpotenzials)
$[k_{\mathrm{s}}]$	$= \mathrm{cm \cdot s^{-1}}$	Durchlässigkeitsbeiwert, Leitvermögen bei Vollsättigung
$[\alpha]$	$= \mathrm{cm^{-1}}$	Funktionsparameter

[h] = cm Wasserspannung (positiv genommenes Matrixpotenzial; $h = |\psi_m|$)

benutzt wird, kann der Beiwert bzw. Funktionsparameter α als Kapillarlängenparameter α^* aufgefasst und daher eben berechnet werden aus $\alpha = k_{fs} / \phi_m$.

Auswertung, wenn die Kombination aus beiden Messreihen negative Resultate liefert

Erhält man für k_{fs} oder für ϕ_m negative Werte, so ist dies auf Inhomogenitäten im Boden wie z. B. Wurzelgänge, Regenwurmkanäle oder ähnliches zurückzuführen oder ein Hinweis auf die Heterogenität (Schichtung). Eine weitere Ursache können abweichende Rand- und Anfangsbedingungen sein (keine konstante Verteilung des Wasseranteils und der Wasserspannung im Boden, keine freie Abströmung seitlich oder nach unten etc.). In jedem Fall sind dann weitere Erkundungen zur gesicherten Ermittlung der Leitfähigkeit notwendig.
Die neuere Version der Gebrauchsanleitung [SoilMoisture Equipment Corp., 2008] empfiehlt für diesen Fall oder wenn sich unplausible α^*-Werte ergeben (etwa $\alpha^*/\text{cm}^{-1} < 0{,}01$ oder $\alpha^*/\text{cm}^{-1} > 0{,}5$) die beiden Messreihen separat auszuwerten. Der makroskopische Kapillarlängenparameter α^* ist in diesem Fall kein Resultat aus dem Versuch, sondern eine Eingangsgröße für die Auswertung, die entweder mittels der Tabelle 5-1 oder der Ausnutzung anderweitiger Information über die hydraulischen Bodeneigenschaften festzulegen ist. Die maßgebliche Formel für die Auswertung ist nach wie vor die Gleichung 5-2, in der allerdings ϕ_m lt. Gleichung 5-6 durch den Quotienten aus k_{fs} und der nunmehrigen Konstante α^* ersetzt wird

$$Q = \frac{2\pi \cdot H^2}{C} \cdot k_{fs} + \pi \cdot R^2 \cdot k_{fs} + \frac{2\pi \cdot H}{C} \cdot \frac{k_{fs}}{\alpha^*}.$$

Die Auflösung dieser Gleichung nach k_{fs} liefert

$$k_{fs} = \frac{C \cdot Q}{2\pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C + 2\pi \cdot H / \alpha^*}. \qquad (5\text{-}7a)$$

Das Matrixflusspotenzial ergibt sich, wenn man diese Gleichung für k_{fs} in die Beziehung 5-6 einsetzt:

$$\phi_m = \frac{C \cdot Q}{(2\pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C) \cdot \alpha^* + 2\pi \cdot H} \qquad (5\text{-}7b)$$

Aus den beiden Messreihen erhält man jeweils ein Resultat für k_{fs} und ϕ_m, und die neuere Gebrauchsanleitung empfiehlt als Endergebnis das Mittel aus den Werten auszuweisen.

Die neuere Anleitung enthält auch ein Rechenbeispiel für diesen Fall. Seine Auswertung mittels EXCEL-Arbeitsblatt ist auf Seite 64 zu sehen.

Unter Standardbedingungen erhält man mit $C_1 = 0{,}821$ und für $C_2 = 1{,}25$ (siehe S. 55)

$$k_{fs\,1} = \frac{0{,}821}{2\pi \cdot 5{,}0^2 + \pi \cdot 3{,}0^2 \times 0{,}821 + 2\pi \cdot 5{,}0 / \alpha^*} \cdot Q_1 \qquad (H = 5\text{ cm})$$

$$\boxed{\frac{k_{fs\,1}}{\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{1}{220 + \dfrac{38{,}3}{\alpha^* / \text{cm}^{-1}}} \cdot \frac{Q_1}{\text{cm}^3 \cdot s^{-1}}} \qquad (H = 5\text{ cm})$$

$$\phi_{m\,1} = \frac{0{,}821\, Q_1}{(2\pi \cdot 5{,}0^2 + \pi \cdot 3{,}0^2 \times 0{,}821) \cdot \alpha^* + 2\pi \cdot 5{,}0} \qquad (H = 5\text{ cm})$$

$$\frac{\phi_{m\,1}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = \frac{1}{220\,\alpha^* / \text{cm}^{-1} + 38{,}3} \cdot \frac{Q_1}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \qquad (H = 5\text{ cm})$$

$$\boxed{\frac{k_{\mathrm{fs}\,2}}{\mathrm{cm\cdot s^{-1}}} = \frac{1}{531 + \dfrac{50{,}3}{\alpha^*/\mathrm{cm^{-1}}}} \cdot \frac{Q_2}{\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}}} \qquad (H = 10\,\mathrm{cm})$$

$$\frac{\phi_{\mathrm{m}\,2}}{\mathrm{cm^2\cdot s^{-1}}} = \frac{1}{531\,\alpha^*/\mathrm{cm^{-1}} + 50{,}3} \cdot \frac{Q_2}{\mathrm{cm^3\cdot s^{-1}}} \qquad (H = 10\,\mathrm{cm})$$

Als Versuchsergebnis ist das Mittel der beiden Werte anzugeben:

$$k_{\mathrm{fs}} = \frac{k_{\mathrm{fs}\,1} + k_{\mathrm{fs}\,2}}{2} \qquad \text{und} \qquad \phi_{\mathrm{m}} = \frac{\phi_{\mathrm{m}\,1} + \phi_{\mathrm{m}\,2}}{2}.$$

Anmerkungen

Die mit dem GPM bestimmte Durchlässigkeit ist ein mittlerer *k*-Wert für das am Fluss beteiligte feldgesättigte, aber auch ungesättigte Strömungsgebiet, in dem die Strömung nach verschiedenen Richtungen erfolgt. Im Gegensatz zum Doppelzylinder-Infiltrometer, bei dem die Abströmung nahezu ausschließlich vertikal erfolgt und somit die vertikale Durchlässigkeit erfasst wird, verlässt das Wasser bei der GPM das Bohrloch über die Sohle und über die Seitenwand. Daraus folgt, dass nicht nur die vertikale Komponente der Durchlässigkeit, sondern auch die horizontale erfasst wird. Die Wassertiefen werden bei der GPM normalerweise auf ein eher niedrigeres Niveau eingestellt (eben $H_1 = 5\,\mathrm{cm}$ und $H_2 = 10\,\mathrm{cm}$) (um die benötigten Wassermengen klein zu halten), während sie bei der sogenannten „umgekehrten Bohrlochmethode“ eher größer gewählt werden. Der Anteil der horizontalen Komponente ist bei der umgekehrten Bohrlochmethode daher im Allgemeinen größer als beim GPM. Da völlige Isotropie selten anzutreffen ist, ergeben sich daraus zwangsläufig Unterschiede in den Messergebnissen zwischen dem Doppelzylinder-Infiltrometer, dem Guelph-Permeameter und der umgekehrten Bohrlochmethode.

Das Guelph-Permeameter kann auch verwendet werden, wenn nicht genug Wasser vorhanden ist um beide Reservoirs vollzufüllen. Dafür wird die Vakuumhandpumpe aus dem Transportkoffer gebraucht. Nähere Erläuterungen siehe in der Gebrauchsanleitung.

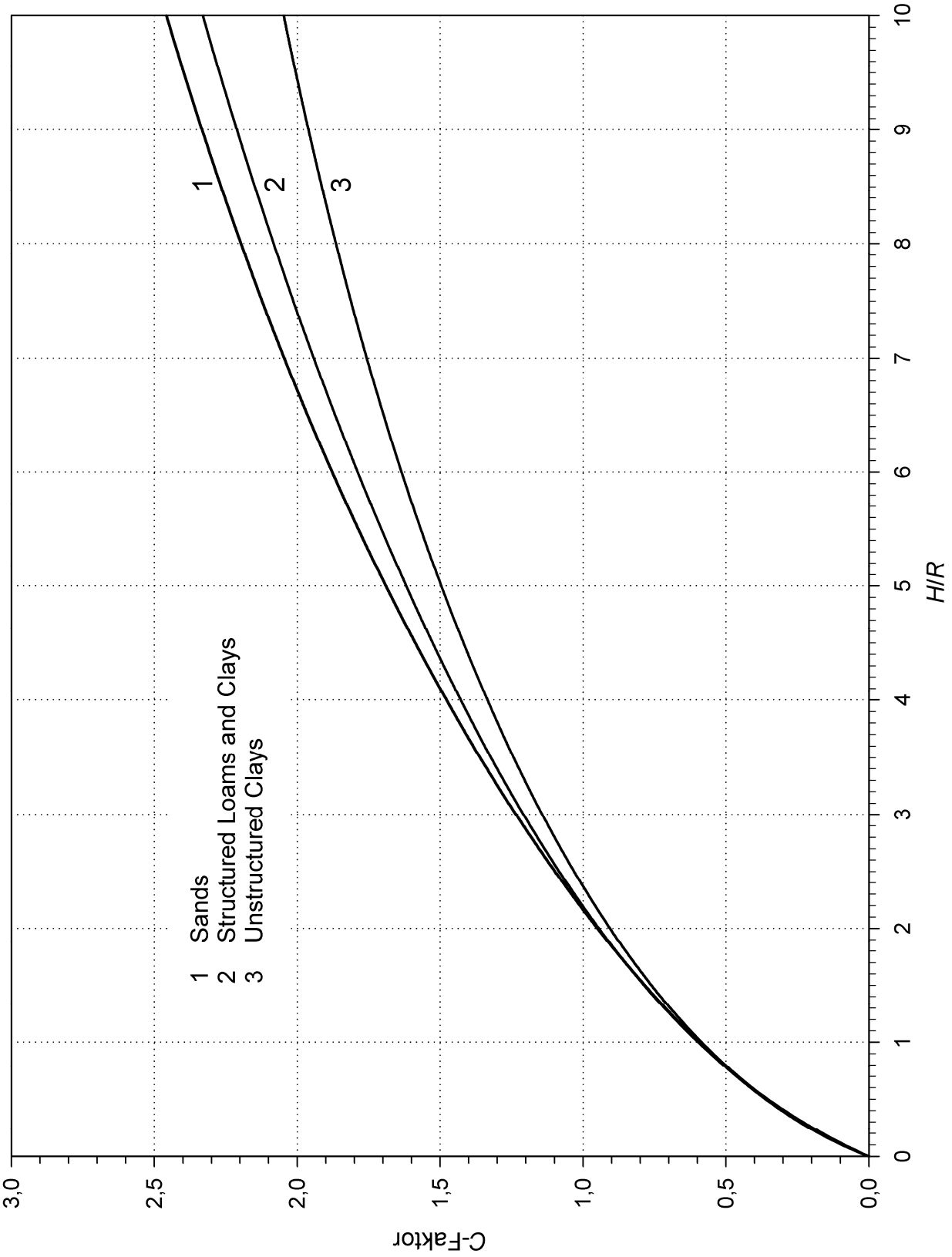


Abbildung 5-6: Abhängigkeit des *C*-Wertes vom Verhältnis *H*/*R* für drei verschiedene Bodenarten (nach GPM-Gebrauchsanweisung)

Versuchsprotokoll der Standard-Guelph-Permeameter-Messung

Bezeichnung:	Bergltal – Obstlerfeld 1	Gerät Nr.:	10793
Versuchsdatum:	2004-02-30	Gerätespezifische Zellkonstanten siehe Ventilknopf! X / cm² =	35,13
Durchführender:	E. Schmidt	Y / cm² =	2,15
Bohrlochradius R / cm =	3,0		

Kerbe am Ventilknopf		Messreihe 1	Messreihe 2
X: beide Zylinder	oben	Wassertiefe H / cm =	5,0	10,0
Y: nur Innenzylinder	unten	A_{Res} = X oder Y:	Y	Y
quasistationäre Absenkung		Δs / cm ± 0,1 =	1,2	1,0
im Zeitintervall		Δt / s ± 1 =	60	30
Absenkrate $q = \Delta s / \Delta t$		q / (cm/s) =	0,020	0,033
Fluss $Q = q \cdot A_{Res}$		Q / (cm³/s) =	0,043	0,072

Messreihe 1				Messreihe 2			
Zeit		Absenkung		Zeit		Absenkung	
t hh:mm:ss	Δt / s ± 1	s / cm ± 0,1	Δs / cm ± 0,1	t hh:mm:ss	Δt / s ± 1	s / cm ± 0,1	Δs / cm ± 0,1
05:57:00		57,6		06:14:00		22,6	
05:58:00	60	54,0	3,6	06:14:30	30	19,7	2,9
05:59:00	60	50,3	3,7	06:15:00	30	17,0	2,7
06:00:00	60	47,1	3,2	06:15:30	30	15,2	1,8
06:01:00	60	44,5	2,6	06:16:00	30	13,7	1,5
06:02:00	60	42,7	1,8	06:16:30	30	12,5	1,2
06:03:00	60	40,9	1,8	06:17:00	30	11,5	1,0
06:04:00	60	39,6	1,3	06:17:30	30	10,6	0,9
06:05:00	60	38,4	1,2	06:18:00	30	9,6	1,0
06:06:00	60	37,3	1,1	06:18:30	30	8,5	1,1
06:07:00	60	36,1	1,2			7,5	1,0
06:07:00		34,9	1,2				

$$\frac{k_{fs}}{cm \cdot s^{-1}} = 0{,}0041 \cdot \frac{Q_2}{cm^3 \cdot s^{-1}} - 0{,}0054 \cdot \frac{Q_1}{cm^3 \cdot s^{-1}} \qquad \frac{\phi_m}{cm^2 \cdot s} = 0{,}0572 \cdot \frac{Q_1}{cm^3 \cdot s^{-1}} - 0{,}0237 \cdot \frac{Q_2}{cm^3 \cdot s^{-1}}$$

k_{fs}/(cm·s^{-1}) = 0,0041× 0,072 − 0,0054× 0,043 = 6,3×10^{-5} $\quad \alpha^* = k_{fs} / \phi_m$ = 0,084 cm^{-1}

ϕ_m / (cm²·s) = 0,0572× 0,043 − 0,0237× 0,072 = 7,5×10^{-4} $\quad h_f = 1 / \alpha^*$ = 12 cm

Auswertung der Guelph-Permeameter-Messung

Bezeichnung:	Bergltal – Obstlerfeld 1	Gerät Nr.:	10793
Versuchsdatum:	2004-02-30	Gerätespezifische Zellkonstanten siehe Ventilknopf! X / cm² =	35,13
Durchführender:	E. Schmidt	Y / cm² =	2,15

Kurve 1, 2 oder 3:	1	Bohrlochradius	Standard: R / cm =	3,0
Kurve 1 – $\alpha^* \geq 0{,}09$ cm^{-1} (Standard)			R / cm ± 0,1 =	3,0
Kurve 2 – $\alpha^* = 0{,}04$ cm^{-1} (Kurven-Nr.				
Kurve 3 – $\alpha^* = 0{,}01$ cm^{-1} siehe Rückseite)				

			Messreihe 1	Messreihe 2
Wassertiefe im Bohrloch	Standard:	H / cm =	5,0	10,0
Zellkonstante: Kerbe am Ventilknopf		H / cm ± 0,1 =	5,0	10,0
X: beide Zylinder oben		$A_{Res} = X$ oder Y:	Y	Y
Y: nur Innenzylinder unten				
quasistationäre Absenkung		Δs / cm ± 0,1 =	1,2	1,0
im Zeitintervall		Δt / s ± 1 =	60	30
geometrisches Verhältnis H/R	Standard:	H/R =	1,67	3,33
		H/R =	1,67	3,33
Absenkrate $q = \Delta s / \Delta t$		q / (cm/s) =	0,0200	0,0333
Fluss $Q = q \cdot A_{Res}$		Q / (cm³/s) =	0,0430	0,0717
Formfaktor $C = f(H/R$, Soil Type)		C =	0,803	1,288

$$G_2 = \frac{H_1 \cdot C_2}{\pi \cdot (2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))} \qquad G_1 = G_2 \cdot \frac{H_2 \cdot C_1}{H_1 \cdot C_2}$$

$$J_1 = \frac{(2\,H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1}{2\,\pi \cdot (2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))} \qquad J_2 = J_1 \cdot \frac{(2\,H_1^2 + R^2 \cdot C_1) \cdot C_2}{(2\,H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1}$$

Koeffizienten	G_2 =	0,004219	Koeffizienten	G_1 =	0,005264
	J_1 =	0,055691		J_2 =	0,024147

beide Messreihen gemeinsam

$k_{fs} = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1$

$\phi_m = J_1 \cdot Q_1 - J_2 \cdot Q_2$

beide Messreihen getrennt

			Mittel	Messreihe 1	Messreihe 2
feldgesättigte Durchlässigkeit	k_{fs} / (cm/s) =	7,6E−05	7,8E−05	7,82E−05	7,77E−05
Matrixfluss-potenzial	ϕ_m / (cm²/s) =	6,6E−04	6,5E−04	6,52E−04	6,47E−04
mak. Kapillarlängenparameter	α^* / cm^{-1} =	0,11	0,12	α^* festgelegt	
Wasserspannungshöhe	h_f / cm =	9			

$\alpha^* = k_{fs} / \phi_m$

$h_f = 1 / \alpha^* = \phi_m / k_{fs}$

$$k_{fs} = \frac{C \cdot Q}{2\,\pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C + 2\,\pi \cdot H / \alpha^*}$$

$$\phi_m = \frac{C \cdot Q}{(2\,\pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C) \cdot \alpha^* + 2\,\pi \cdot H}$$

Ermittlung des *C*-Faktors

als Funktionswert der Anpassungsfunktion $C = f(\text{Soil Type}, H/R)$

Para-meter	Funktionsparameter für Kurve 1 $\alpha^* \geq 0{,}09\ cm^{-1}$	Kurve 2 $\alpha^* = 0{,}04\ cm^{-1}$	Kurve 3 $\alpha^* = 0{,}01\ cm^{-1}$
a_0 =	2,074	1,992	2,102
a_1 =	0,093	0,091	0,118
a_2 =	0,754	0,683	0,655

$$C(H/R) = \left[\frac{H/R}{a_0 + a_1 \cdot H/R}\right]^{a_2}$$

Parameterwerte für geg. Fall:
2,074
0,093
0,754

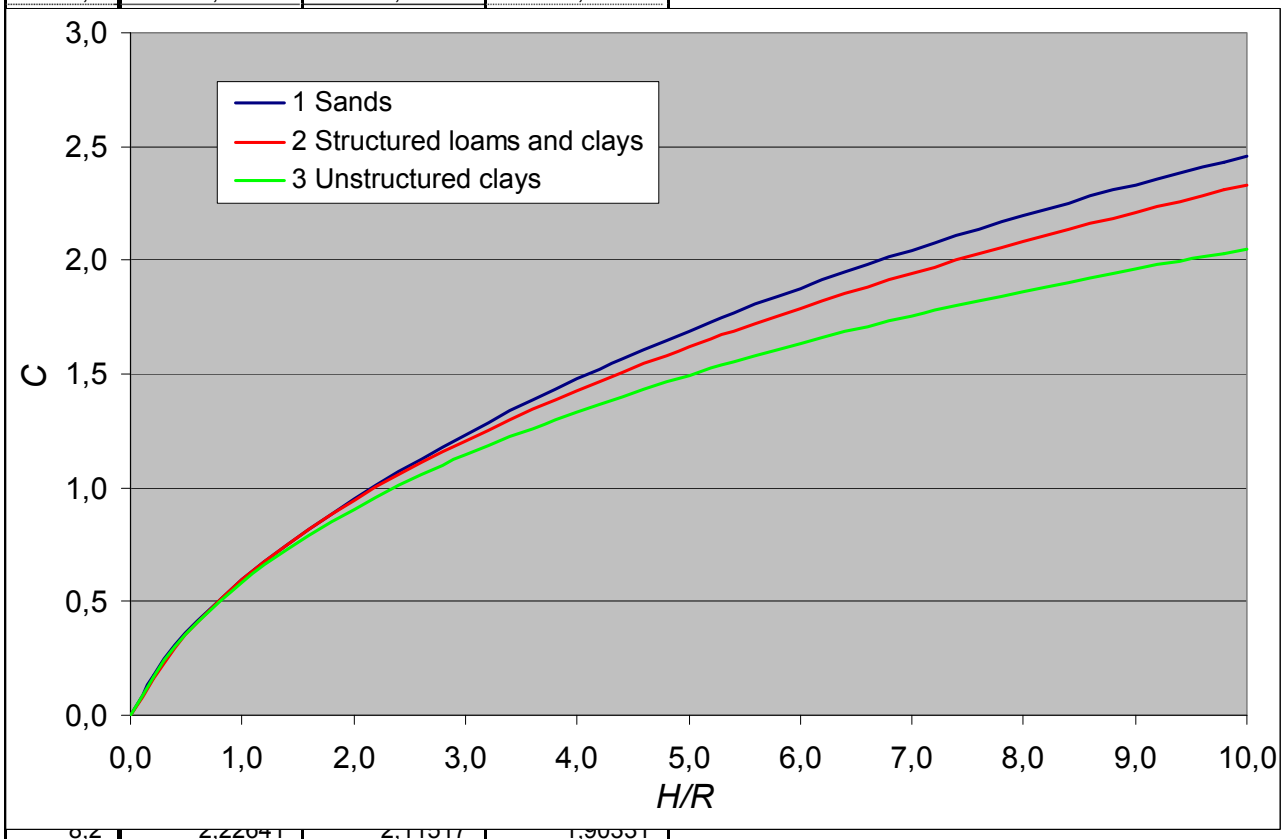
H/*R*	Funktionswerte für Kurve 1	Kurve 2	Kurve 3
0,0	0,00000	0,00000	0,00000
0,2	0,17029	0,20677	0,21265
0,4	0,28527	0,32993	0,33244
0,6	0,38473	0,43256	0,43047
0,8	0,47480	0,52330	0,51606
1,0	0,55816	0,60581	0,59311
1,2	0,63631	0,68208	0,66373
1,4	0,71018	0,75336	0,72924
1,6	0,78045	0,82049	0,79051
1,8	0,84759	0,88409	0,84820
2,0	0,91197	0,94462	0,90278
2,2	0,97388	1,00243	0,95463
2,4	1,03356	1,05782	1,00406

Anpassungsfunktion und Parameterwerte von

Zhang Z F, Groenevelt P H, Parkin G W. 1998.
The well shape-factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph permeameter.
Soil Tillage Res. 49:219-221

Zitiert auf S. 848 in:

Dane J H, Topp G C. 2002.
Methods of Soil Analysis Part 4: Physical Methods.
Wisconsin, USA: Soil Science Society of America



8,2	2,22641	2,11317	1,90331
8,4	2,25609	2,14057	1,92391
8,6	2,28526	2,16549	1,94409
8,8	2,31393	2,18996	1,96386
9,0	2,34213	2,21399	1,98323
9,2	2,36986	2,23759	2,00222
9,4	2,39713	2,26078	2,02084
9,6	2,42397	2,28356	2,03910
9,8	2,45038	2,30596	2,05700
10,0	2,47636	2,32797	2,07458

Auswertung der Guelph-Permeameter-Messung

Bezeichnung:	neuere Gebrauchsanleitung, Beispiel 3	Gerät Nr.:	–
Versuchsdatum:	2008	Gerätespezifische Zellkonstanten siehe Ventilknopf! X / cm² =	24,93
Durchführender:	–	Y / cm² =	–

Kurve 1, 2 oder 3:	1	Bohrlochradius	Standard: R / cm =	3,0
Kurve 1 – $\alpha^* \geq 0{,}09$ cm^{-1} (Standard)			R / cm ± 0,1 =	3,0
Kurve 2 – $\alpha^* = 0{,}04$ cm^{-1} (Kurven-Nr.				
Kurve 3 – $\alpha^* = 0{,}01$ cm^{-1} siehe Rückseite)				

			Messreihe 1	Messreihe 2
Wassertiefe im Bohrloch	Standard:	H / cm =	5,0	10,0
Zellkonstante: Kerbe am Ventilknopf		H / cm ± 0,1 =	9,0	21,0
X: beide Zylinder oben		$A_{Res} = X$ oder Y:	X	X
Y: nur Innenzylinder unten				
quasistationäre Absenkung		Δs / cm ± 0,1 =	0,7	4,2
im Zeitintervall		Δt / s ± 1 =	1000	1000
geometrisches Verhältnis H/R	Standard:	H/R =	1,67	3,33
		H/R =	3,00	7,00
Absenkrate $q = \Delta s / \Delta t$		q / (cm/s) =	0,0007	0,0042
Fluss $Q = q \cdot A_{Res}$		Q / (cm³/s) =	0,0175	0,1047
Formfaktor $C = f(H/R$, Soil Type)		C =	1,212	1,952

$$G_2 = \frac{H_1 \cdot C_2}{\pi \cdot (2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))} \qquad G_1 = G_2 \cdot \frac{H_2 \cdot C_1}{H_1 \cdot C_2}$$

$$J_1 = \frac{(2\,H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1}{2\,\pi \cdot (2\,H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))} \qquad J_2 = J_1 \cdot \frac{(2\,H_1^2 + R^2 \cdot C_1) \cdot C_2}{(2\,H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1}$$

Koeffizienten	G_2 =	0,001252	Koeffizienten	G_1 =	0,001814
	J_1 =	0,038849		J_2 =	0,012030

beide Messreihen gemeinsam

$k_{fs} = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1$

$\phi_m = J_1 \cdot Q_1 - J_2 \cdot Q_2$

beide Messreihen getrennt

			Mittel	Messreihe 1	Messreihe 2
feldgesättigte Durchlässigkeit	k_{fs} / (cm/s) =	9,9E−05	2,2E−05	1,08E−05	3,34E−05
Matrixfluss-potenzial	ϕ_m / (cm²/s) =	−5,8E−04	5,5E−04	2,70E−04	8,34E−04
mak. Kapillarlängenparameter	α^* / cm^{-1} =	−0,17	0,04	α^* festgelegt	
Wasserspannungshöhe	h_f / cm =	−6			

$\alpha^* = k_{fs} / \phi_m$

$h_f = 1 / \alpha^* = \phi_m / k_{fs}$

$$k_{fs} = \frac{C \cdot Q}{2\,\pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C + 2\,\pi \cdot H / \alpha^*}$$

$$\phi_m = \frac{C \cdot Q}{(2\,\pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C) \cdot \alpha^* + 2\,\pi \cdot H}$$

6. AGGREGATSTABILITÄT

Diese wird nach der Methode von Kemper und Koch [1966] in modifizierter Form bestimmt.

Geräte und Reagenzien

- Siebtauchapparat; bestehend aus einer Wanne (L = 32 cm, B = 26 cm, H = 10 cm), einer Wippvorrichtung mit elektrischem Antrieb für zwei Becherreihen, wobei pro Reihe drei Becher eingehängt sind. Auf die Wanne wird ein Deckel mit 6 runden Ausnehmungen aufgesetzt, in denen Siebhalterungen stecken. Die Siebhalterungen sind so angeordnet, dass jedes Sieb in den darunter liegenden Becher hineinreicht. Die Siebhalterung hat einen Innendurchmesser von 38 mm; das Sieb ist ein 60-maschiges Netz mit einer lichten Weite von 0,25 mm im Quadrat. Die mechanische Hubhöhe beträgt 1,27 cm, die Hubfrequenz 42 Hübe pro Minute.
- Waage; Genauigkeit ±0,01 g und Wägeschiffchen
- 0,4 n-Natriumpyrophosphat-Lösung zur Dispergierung; hierfür werden 89,22 g·$Na_4P_2O_7$·10 H_2O in einem 2-L-Messkolben mit wenig Wasser aufgelöst, auf 2,000 L mit entionisiertem Wasser aufgefüllt und mit dem Magnetrührer gerührt.

Durchführung

4,0 g luftgetrocknete, 1 mm bis 2 mm große Aggregate werden mit einer Genauigkeit von ±0,01 g in ein Wägeschiffchen eingewogen (m_{Pr}) (bei einer rel. Luftfeuchtigkeit im Labor > 30 % soll eine zusätzliche, 4 g schwere Aggregatprobe ofengetrocknet werden, um den Wassergehalt zu bestimmen) und auf das oben beschriebene Sieb in die Siebhalterung gegeben. Danach wird der Deckel mit der Siebhalterung auf die Wanne aufgesetzt und 5 Minuten lang im destillierten Wasser (ca. 80 mL) gesiebt. Nach dem Aufsetzen des Deckels sollte kontrolliert werden, ob Aggregate auf der Wasseroberfläche schwimmen; diese werden mit ein paar Tropfen aus einer Spritzflasche zum Sinken gebracht. Während des Siebvorganges sollte sich das Sieb mit den Aggregaten unter Wasser befinden, die Aggregate dürfen nicht über die Wasseroberfläche gehoben werden. Die Temperatur des destillierten Wassers in den Bechergläsern soll zwischen 22 °C und 25 °C betragen. Nach 5 Minuten wird der Deckel mit den Siebhalterungen von der Wanne genommen und die zurückgebliebenen Aggregate sowie der Sand werden aus den einzelnen Siebhalterungen in ein Wägegläschen gespült und bei 105 °C ofengetrocknet. Das Gläschen mit den Aggregaten und dem Sand wird gewogen (m_{AS}), danach eine 0,4 n-Natriumpyrophosphat-Lösung dem Gläschen zugegeben und ca. 2 Stunden stehen gelassen. Anschließend wird der Inhalt des Schälchens in die Siebhalterung zurückgespült und 5 Minuten lang im Apparat gesiebt. Nach dieser Zeit bleibt nur mehr der Sand mit einem Durchmesser > 0,25 mm am Sieb zurück (sollten noch Aggregate vorhanden sein, kann mit einem Gummipistill gerieben werden, bis nur der reine Sand übrig bleibt). Der Sand wird in das Gläschen zurückgespült, ofengetrocknet und gewogen (m_S).

Auswertung

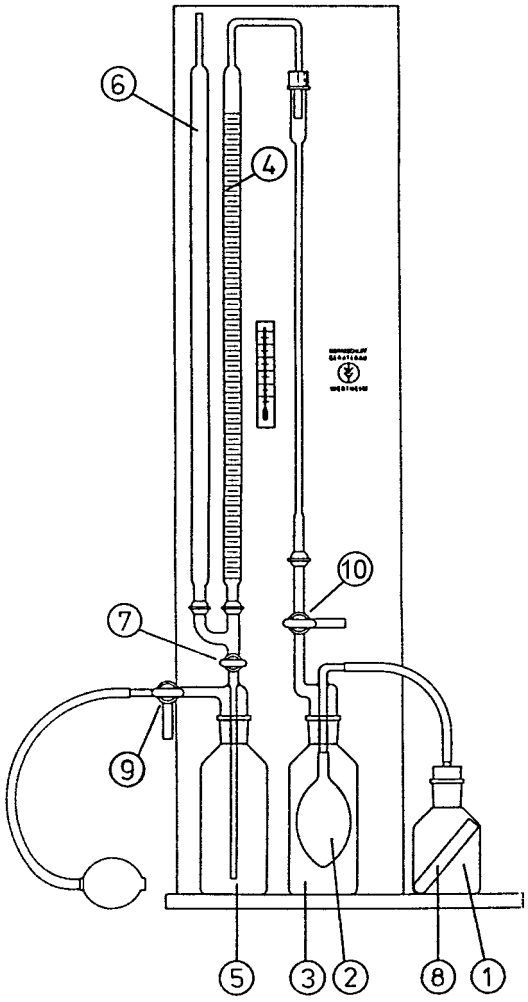
Der Prozentsatz der Aggregatstabilität ergibt sich aus $\frac{AS}{\%} = \frac{m_{AS} - m_S}{m_{Pr} - m_S} \times 100.$

7. BESTIMMUNG VON CARBONAT

Im Boden eventuell vorhandene Carbonate (vor allem $CaCO_3$, aber auch $MgCO_3$, $FeCO_3$ und Na_2CO_3) werden durch Salzsäure zerstört und als CO_2 ausgetrieben. Das entweichende CO_2 wird mittels Scheibler-Apparatur gasvolumetrisch bestimmt.

Das *Calcimeter* nach Scheibler gestattet die entwickelte Menge an CO_2 ohne Absorptionsverluste im Sperrmedium durch Trennen der Phasen mittels der Scheiblerblase zu messen.

Das im Reaktionsgefäß (1) gebildete CO_2 füllt die Scheiblerblase (2) in der Flasche (3) und verdrängt dort eine äquivalente Luftmenge. Diese drückt die Sperrflüssigkeit aus dem Messrohr (4) in den Vorratsbehälter (5). Das Niveaurohr (6) dient zu einer einwandfreien Ablesung.



Geräte

- Scheibler-Apparatur
- Thermometer
- Barometer

Reagenzien

- Salzsäure halbkonzentriert
  HCl conc. mit dest. Wasser 1:2 verdünnen
- Sperrflüssigkeit:
  mit Schwefelsäure angesäuertes Wasser, mit einigen Tropfen Indikator versetzt

Durchführung

Vor Inbetriebnahme der Apparatur wird der Vorratsbehälter (5) mit Sperrflüssigkeit aus einer schwach schwefelsauren $CuSO_4$-Lösung gefüllt.

a) je nach Kalkgehalt 0,5 g bis 5 g ofentrockenen Boden in das Reaktionsgefäß (1) einwägen (bei vielen Böden sollte man nicht mehr als 1 g nehmen)
b) Reagenzröhrchen (8) mit 5 mL HCl füllen und mit einer Pinzette vorsichtig in das Reaktionsgefäß stellen (es darf vorerst noch keine Salzsäure mit dem Boden in Berührung kommen!)
c) Reaktionsgefäß an die Apparatur anschließen
d) Dreifachhahn (9) so einstellen, dass der Markierungspunkt nach unten weist (Verbindung zwischen Gummiball und Sperrflüssigkeitsbehälter (5) ist dann geöffnet, der Luftaus- und –eintritt geschlossen)
e) Hahn (7) öffnen

f) Dreifachhahn (10) so einstellen, dass der Markierungspunkt nach rechts weist (alle drei Verbindungen sind freigegeben, Luftzu- und -austritt ist möglich)
g) Sperrflüssigkeit mit Hilfe des Gummiballs in beide Röhren langsam bis zur Nullmarke drücken und Hahn (7) schließen
h) Dreifachhahn (9) um 180° drehen (ermöglicht freien Luftzutritt in den Sperrflüssigkeitsbehälter; Markierungspunkt nun unten)
i) Hahn (10) ebenfalls um 180° drehen (Markierungspunkt nun links; Luftmasse zwischen Scheiblerblase und Sperrflüssigkeitsspiegel ist damit abgeschlossen)
j) Hahn (7) so lange öffnen, bis der Flüssigkeitsspiegel im Niveaurohr etwa bis zur halben Höhe abgesunken ist (dadurch wird verhindert, dass später durch die rasche Expansion der Scheiblerblase die Sperrflüssigkeit aus dem Niveaurohr gedrückt wird. Wegen des im Messrohr entstehenden Unterdrucks sinkt der Flüssigkeitsspiegel in diesem weniger weit ab als im Niveaurohr)
k) Reaktionsgefäß kippen und damit die Salzsäure auf die Probe aufbringen; vorsichtig schütteln. Sollte sehr viel Gas entstehen und dadurch die Sperrflüssigkeit Gefahr laufen aus dem Niveaurohr gedrückt zu werden, noch etwas Flüssigkeit durch kurzes Öffnen von Hahn (7) ablassen. Nach ungefähr 5 Minuten ist die Reaktion beendet.
l) Hahn (9) um 180° drehen (Punkt nun oben)
m) Flüssigkeitsspiegel im Messrohr befindet sich unter dem im Niveaurohr:
n) Hahn (7) öffnen und mit dem Gummiball Sperrflüssigkeit hinaufpressen, bis Niveaugleichheit in beiden Rohren erreicht ist; Hahn (7) schließen
o) Flüssigkeitsspiegel im Messrohr befindet sich über dem im Niveaurohr:
p) Hahn (7) so lange öffnen und damit Sperrflüssigkeit ablassen, bis Niveaugleichheit in beiden Rohren erreicht ist (sollte die Komprimierung der Luft im Sperrflüssigkeitsbehälter keine ausreichende Absenkung erlauben, durch kurze Drehung des Hahnes (9) ein wenig Luft entweichen lassen)
q) das entstandene Volumen an CO_2 in mL (V_{Abl}) am Messrohr ablesen
r) Entleerung der Anlage: Hahn (9) freigeben (Punkt muss nun nach unten weisen)
s) Hahn (10) freigeben (Punkt muss nun nach rechts weisen)
t) Hahn (7) öffnen
u) Reaktionsgefäß abnehmen und Probe entsorgen.

Auswertung

Der Versuch ist mit der Formel 7-3 auszuwerten:

$$\frac{w(CaCO_3)}{\%} = \frac{0{,}12120 \times \frac{V_{Abl}}{mL} \cdot \frac{p}{hPa}}{\frac{m_s}{g} \cdot \left(\frac{t}{°C} + 273{,}15 \right)} \cdot f \,.$$

$[w(CaCO_3)] = \%$ Massenanteil des Kalks in Prozent. Die Berechnung beruht auf der Annahme, dass das gesamte im Reaktionsgefäß freigesetzte Gas CO_2 ist, dieses ausschließlich aus $(CO_3)^{2-}$ hervorgegangen ist und lediglich Kalk vorhanden war (und keine anderen Carbonate)

$[V_{Abl}] = mL$ abgelesenes CO_2-Volumen

$[p]$	= hPa	atmosphärischer Luftdruck, unter dem das Volumen V_{Abl} gemessen wurde
$[m_s]$	= g	eingewogene (ofentrockene) Feststoffmasse an Boden
$[t]$	= °C	beim Versuch herrschende Temperatur
$[f]$	= 1	Korrekturfaktor (beträgt etwa 0,9); sollte täglich anhand eines Standards bestimmt werden

Näheres zur Auswerteformel siehe im folgenden Kapitel.

Unter der Annahme, dass der gesamte anorganische Kohlenstoff in der Probe als Carbonat vorliegt, kann aus dem Scheiber-Resultat auch auf den Gehalt an anorganischem Kohlenstoff geschlossen werden. Die molare Masse von Calciumcarbonat beträgt $100\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$ und jene von Kohlenstoff $12\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$. Man erhält also

$$w(\mathrm{C_{anorg}}) = w(\mathrm{CaCO_3}) \cdot \frac{M(\mathrm{C})}{M(\mathrm{CaCO_3})} = w(\mathrm{CaCO_3}) \cdot \frac{12}{100} = w(\mathrm{CaCO_3}) \cdot 0{,}12\,.$$

Theorie

Um die CO_2-Masse zu berechnen, die in dem produzierten Volumen enthalten ist, müsste die Dichte unter den herrschenden atmosphärischen Bedingungen bekannt sein. Nachdem ihr Wert in der Literatur nur für den Normzustand angegeben ist, muss das vom Druck und von der Temperatur abhängig Volumen auf den atmosphärischen Normzustand umgerechnet werden. Dieser Normzustand ist durch den Druck $p_0 = 101325\,\mathrm{Pa}$ (entspricht etwa dem durchschnittlichen Atmosphärendruck auf Meereshöhe) und die Temperatur $T_0 = 273{,}15\,\mathrm{K}$ (= 0,00 °C) definiert. Setzt man die Gültigkeit des Gesetzes idealer Gase voraus, ist der Zusammenhang zwischen dem herrschenden Zustand und dem Normzustand (bei gleicher CO_2-Masse) gegeben durch

$$\frac{p \cdot V_{Abl}}{T} = n \cdot R = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}\,.$$

$[p]$	= Pa	herrschender Gasdruck (atmosphärischer Luftdruck)
$[V_{Abl}]$	= m^3	eingenommenes Volumen an CO_2
$[n]$	= mol	Stoffmenge
$[R]$	= $J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$	universelle (molare) Gaskonstante; $R = 8{,}314510\,\mathrm{J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}}$
$[T]$	= K	herrschende Temperatur
$[p_0]$	= Pa	Luftdruck des Normzustandes
$[V_0]$	= m^3	Volumen, das die freigesetzte Menge an CO_2 unter Normbedingungen einnimmt
$[T_0]$	= K	Temperatur des Normzustandes

Beachte, dass die Temperatur T in dieser Gleichung unbedingt in der Einheit Kelvin einzusetzen ist! Die Gegenüberstellung der beiden Zustände liefert das CO_2-Volumen V_0 unter Normbedingungen

$$V_0 = V_{Abl} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0}\,. \qquad (7\text{-}1)$$

Nachdem die Temperatur in der Einheit °C gemessen wird, jedoch in der Einheit Kelvin einzusetzen ist, muss noch der Messwert t mit der Gleichung 12-4 (siehe Anhang) umgerechnet werden:

$$T = \left(\frac{t}{°\mathrm{C}} + 273{,}15\right)\mathrm{K}\,.$$

$[t]$	= °C	Temperatur des Gasvolumens in Grad Celsius
$[T]$	= K	Temperatur des Gasvolumens in Kelvin

Mit den Werten p_0 und T_0 des atmosphärischen Normzustandes erhält man für die Gleichung 7-1

$$V_0 = V_{\mathrm{Abl}} \cdot \frac{273{,}15\,\mathrm{K}}{\left(\frac{t}{^\circ\mathrm{C}} + 273{,}15\right)\mathrm{K}} \cdot \frac{p}{101325\,\mathrm{Pa}}.$$

Wenn man das Volumen V_0 in der Einheit mL (bzw. cm^3) erhalten möchte, die Angabe von V_{Abl} in derselben Einheit erfolgen soll und der Druck in der Einheit hPa angegeben werden soll, dann lautet die entsprechende zugeschnittene Größengleichung

$$\frac{V_0}{\mathrm{mL}} \times 10^{-6}\,\mathrm{m}^3 = \frac{V_{\mathrm{Abl}}}{\mathrm{mL}} \times 10^{-6}\,\mathrm{m}^3 \cdot 273{,}15\,\mathrm{K} \cdot \frac{1}{\left(\frac{t}{^\circ\mathrm{C}} + 273{,}15\right)\mathrm{K}} \cdot \frac{p}{\mathrm{hPa}} \times 10^2\,\mathrm{Pa} \cdot \frac{1}{101325\,\mathrm{Pa}}$$

und die daraus abgeleitete Zahlenwertgleichung

$$V_0 = V_{\mathrm{Abl}} \cdot \frac{273{,}15}{101325} \times 10^2 \cdot \frac{p}{t + 273{,}15} = \frac{0{,}26958 \times V_{\mathrm{Abl}} \cdot p}{t + 273{,}15}.$$

$[p]$ = hPa herrschender Gasdruck (gemessener atmosphärischer Luftdruck)
$[V_{\mathrm{Abl}}]$ = mL eingenommenes Volumen unter atmosphärischen Bedingungen
$[t]$ = °C herrschende Temperatur

Damit kann angegeben werden, welches Volumen die produzierte CO_2-Gasmasse unter dem atmosphärischen Normzustand einnehmen würde. Die Dichte von CO_2 unter diesen Bedingungen beträgt laut Firmenprospekt EIJKELKAMP $\rho\,[CO_2] = 1{,}9769$ g/L. Lide [2002] gibt übrigens für 25 °C und 101,325 kPa $\rho\,[CO_2] = 1{,}7989$ g/L an. Nachdem für die Dichte $\rho = m/V$ gilt, beträgt die Masse $m = \rho \cdot V$ bzw. $m = \rho_{25°C} \cdot V_{25°C} = \rho_0 \cdot V_0$ und damit $\rho_0 = \rho_{25°C} \cdot V_{25°C}/V_0$. Für das Verhältnis der beiden Volumina kann gemäß dem abgewandelten Gesetz für ideale Gase in Form der Gleichung 7-1

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{T_1}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p_1} = \frac{V_{25°C}}{V_0} = \frac{(25 + 273{,}15)\,\mathrm{K}}{273{,}15\,\mathrm{K}} \cdot \frac{101325\,\mathrm{Pa}}{101325\,\mathrm{Pa}} = 1{,}0915248$$

gesetzt werden. Für den Dichtewert von Lide [2002] unter Standardatmosphärenbedingungen ergibt sich demnach $\rho_0 = 1{,}7989\,\mathrm{g/L} \times 1{,}0915248 = 1{,}9635$ g/L. Ein von Cerbe und Hoffmann [1994] zitierter Wert beträgt $\rho\,(CO_2) = 1{,}9770$ g/L im Normzustand. Trotz dieser Diskrepanzen wird als Referenzwert im Normzustand $\rho\,(CO_2) = 1{,}9769$ g/L (bei $p_0 = 101325$ Pa und $T_0 = 273{,}15$ K) festgelegt.

Die gasförmig freigesetzte Masse an CO_2 beträgt also

$$m_{CO2} = \rho_0 \cdot V_0 = \rho_0 \cdot V_{\mathrm{Abl}} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0}.$$

Nachdem nicht die Masse des entstandenen CO_2 gefragt ist, sondern jene des vorherigen Carbonats $(CO_3)^{2-}$, muss noch für die Reaktion im Reaktionsgefäß der Scheibler-Apparatur zumindest eine vereinfachte stöchiometrische Gleichung aufgestellt werden:

$$2\,H^+Cl^- + Ca^{2+}(CO_3)^{2-} \rightarrow Ca^{2+}Cl_2^{2-} + H_2O + CO_2$$

1 Molekül $CaCO_3$ geht also in ein CO_2-Molekül über:

$A_r\,(Ca) = 40{,}078$, $A_r\,(C) = 12{,}0107$, $A_r\,(O) = 15{,}9994$ (neueste Werte von de Laeter et al. [2003]);

→ $A_r\,(CaCO_3) = 40{,}078 + 12{,}0107 + 3 \times 15{,}9994 = 100{,}0869$;

$A_r\,(CO_2) = 12{,}0107 + 2 \times 15{,}9994 = 44{,}0095$.

Die Masse von 1 g CO_2 entspricht daher der Masse von 100,0869/44,0095 = 2,2742112 g $CaCO_3$.

Die Masse an $CaCO_3$ in der Bodenprobe betrug daher vor dem Versuch

$$m(\mathrm{CaCO_3}) = \rho_0 \cdot V_{\mathrm{Abl}} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0} \times 2{,}2742112 \,.$$

Bezieht man diese Masse auf die Einwaage, erhält man letztlich den Massenanteil an Carbonat in Prozent

$$\frac{w(\mathrm{CaCO_3})}{\%} = \frac{\rho_0}{m_\mathrm{s}} \cdot V_{\mathrm{Abl}} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0} \times 2{,}2742112 \times 100 \,.$$

$[m_\mathrm{s}]$ = g eingewogene (ofentrockene) Feststoffmasse an Boden

Daraus gewinnt man die zugeschnittene Größengleichung

$$\frac{w(\mathrm{CaCO_3})}{\%} = \frac{\dfrac{1{,}9769\times10^{-3}\ \mathrm{g\cdot mL^{-1}}}{\mathrm{g\cdot mL^{-1}}}}{\dfrac{m_\mathrm{s}}{\mathrm{g}}} \cdot \frac{0{,}26958 \times \dfrac{V_{\mathrm{Abl}}}{\mathrm{mL}} \cdot \dfrac{p}{\mathrm{hPa}}}{\dfrac{t}{^\circ\mathrm{C}} + 273{,}15} \times 2{,}2742112 \times 100$$

und die Zahlenwertgleichung

$$\boxed{\frac{w(\mathrm{CaCO_3})}{\%} = \frac{0{,}121199 \times \dfrac{V_{\mathrm{Abl}}}{\mathrm{mL}} \cdot \dfrac{p}{\mathrm{hPa}}}{\dfrac{m_\mathrm{s}}{\mathrm{g}} \cdot \left(\dfrac{t}{^\circ\mathrm{C}} + 273{,}15\right)}} \,. \qquad (7\text{-}2)$$

Analysiert man einen Stoff mit bekanntem Carbonat-Gehalt mit der Scheibler-Apparatur, muss man leider feststellen, dass das Resultat mehr oder weniger vom Sollwert abweicht. Daher sollte jeder Versuchsdurchführende das Gerät praktisch täglich mit einem Standard kalibrieren. Hierzu wird Calciumcarbonat als Reinsubstanz (99 %) mit einer Einwaage von (0,15–0,20) g gemessen. Der Sollwert der Einwaage beträgt dann natürlich $w(\mathrm{CaCO_3})_{\mathrm{Soll}} = 99\,\%$. Das Rechenergebnis mit der Formel 7-2 wird mit einem Korrekturfaktor versehen, um den Sollwert zu ergeben:

$$w(\mathrm{CaCO_3})_{\mathrm{Soll}} = 99\,\% = w(\mathrm{CaCO_3})_{\mathrm{Ist}} \cdot f \,.$$

$[f]$ = 1 Korrekturfaktor (beträgt etwa 0,9); sollte täglich anhand eines Standards bestimmt werden

Der Korrekturfaktor ergibt sich demnach zu

$$f = \frac{w(\mathrm{CaCO_3})_{\mathrm{Soll}}}{w(\mathrm{CaCO_3})_{\mathrm{Ist}}} \,.$$

Sämtliche Messwerte sind mit diesem Faktor zu korrigieren:

$$\frac{w(\mathrm{CaCO_3})}{\%} = \frac{0{,}121199 \times \mathrm{F}\,(V_{\mathrm{Abl}};\mathrm{mL}) \cdot \dfrac{p}{\mathrm{hPa}}}{\dfrac{m_\mathrm{s}}{\mathrm{g}} \cdot \left(\dfrac{t}{^\circ\mathrm{C}} + 273{,}15\right)} \cdot f \,. \qquad (7\text{-}3)$$

<u>Veraltete Auswertung gemäß Firmenprospekt</u>

Für das Volumen, das die produzierte CO_2-Masse unter Standardbedingungen einnimmt, gibt die Fa. EIJKELKAMP in der Anleitung zur Scheibler-Apparatur folgende Näherungsformel an:

$$V_0 = \frac{(p - t/8) \cdot V_{\mathrm{Abl}} \cdot 273}{(273 + t) \cdot 760} \qquad (7\text{-}4)$$

$[V_0]$ = mL Volumen, das die freigesetzte Masse an CO_2 unter Standardbedingungen einnimmt
$[p]$ = Torr atmosphärischer Luftdruck, unter dem das Volumen V_{Abl} gemessen wurde
$[t]$ = °C beim Versuch herrschende Temperatur
$[V_{Abl}]$ = mL abgelesenes CO_2-Volumen

Mit dem Massenverhältnis zwischen Kohlendioxid und Kalk von 2,274 erhält man schließlich für den Massenanteil an Kalk in Prozent $\frac{w(CaCO_3)}{\%} = \frac{V_0 \times \rho_{CO2} \times 100 \times 2{,}274}{m_s}$

$[\rho_{CO2}]$ = $g \cdot L^{-1}$ Dichte von CO_2; ρ_{CO2} = 1,9769 g/L
$[m_s]$ = g eingewogene (ofentrockene) Feststoffmasse an Boden

Eine vereinfachte Berechnung lässt sich mit Hilfe der Tabelle 7-1 durchführen. Diese gibt für den gerade herrschenden Luftdruck in Torr und Temperatur in °C jene theoretische Einwaage in 1/10 mg an, bei der 1 mL CO_2 genau 1 % $CaCO_3$ entsprechen würde. Setzt man diesen Faktor in Verhältnis zur tatsächlichen Einwaage, berechnet sich der Kalkgehalt wie folgt:

$$\frac{w(CaCO_3)}{\%} = \frac{f \times V_{Abl}}{m_s}$$

$[f]$ = 1 Tabellenwert
$[V_{Abl}]$ = mL abgelesenes CO_2-Volumen
$[m_s]$ = $g \times 10^4$ Masse des Bodens (Genauigkeit ±0,1 mg)

Das Ergebnis ist auf zwei signifikante Stellen anzugeben und auf ofentrockenen Boden zu beziehen.

Tabelle 7-1: Theoretische Bodeneinwaage *f* in 1/10 mg, bei der 1 cm^3 CO_2 genau 1 % Kalk entspricht (Bedienungsanleitung EIJKELKAMP)

°C/T	720	722	724	726	728	730	732	734	736	738	740	742	744	746	748	750	752	754	756	758	760	762	764	766	768	770	772	774	776	778	780
10	4049	4060	4072	4083	4094	4106	4117	4129	4140	4151	4163	4174	4186	4197	4209	4220	4231	4243	4254	4266	4277	4288	4300	4311	4323	4334	4345	4357	4368	4380	4391
11	4030	4041	4053	4064	4075	4087	4098	4110	4121	4132	4144	4155	4166	4178	4189	4201	4212	4223	4235	4246	4257	4269	4280	4292	4303	4314	4326	4337	4348	4360	4371
12	4011	4023	4034	4045	4057	4068	4079	4091	4102	4113	4125	4136	4147	4159	4170	4181	4193	4204	4215	4227	4238	4249	4261	4272	4283	4295	4306	4317	4329	4340	4351
13	3993	4004	4015	4027	4038	4049	4060	4072	4083	4094	4106	4117	4128	4139	4151	4162	4173	4185	4196	4207	4118	4230	4241	4252	4264	4275	4286	4298	4309	4320	4331
14	3974	3985	3996	4007	4019	4030	4041	4052	4064	4075	4086	4097	4109	4120	4131	4142	4154	4165	4176	4187	4199	4210	4221	4232	4244	4255	4266	4277	4289	4300	4311
15	3955	3966	3977	3988	3999	4011	4022	4033	4044	4056	4067	4078	4089	4100	4112	4123	4134	4145	4156	4168	4179	4190	4201	4213	4224	4235	4246	4257	4269	4280	4291
16	3935	3947	3958	3969	3980	3991	4002	4014	4025	4036	4047	4058	4070	4081	4092	4103	4114	4125	4137	4148	4159	4170	4181	4192	4204	4215	4226	4237	4248	4259	4271
17	3916	3927	3939	3950	3961	3972	3983	3994	4005	4016	4028	4039	4050	4061	4072	4083	4094	4106	4117	4128	4139	4150	4161	4172	4184	4195	4206	4217	4228	4239	4250
18	3897	3908	3919	3930	3941	3952	3963	3975	3986	3997	4008	4019	4030	4041	4052	4063	4074	4086	4097	4108	4119	4130	4141	4152	4163	4174	4185	4196	4208	4219	4230
19	3877	3888	3899	3910	3921	3932	3943	3955	3966	3977	3988	3999	4010	4021	4032	4043	4054	4065	4076	4087	4098	4109	4120	4131	4143	4154	4165	4176	4187	4198	4209
20	3857	3868	3879	3890	3901	3912	3923	3934	3945	3956	3968	3979	3990	4001	4012	4023	4037	4045	4056	4067	4078	4089	4100	4111	4122	4133	4144	4155	4166	4177	4188
21	3837	3848	3859	3870	3881	3892	3903	3914	3925	3936	3947	3958	3969	3980	3991	4002	4013	4024	4035	4046	4057	4068	4079	4090	4101	4112	4123	4134	4145	4156	4167
22	3817	3828	3839	3850	3861	3872	3883	3894	3905	3916	3927	3938	3949	3960	3971	3981	3992	4003	4014	4025	4036	4047	4058	4069	4080	4091	4102	4113	4124	4135	4146
23	3797	3808	3819	3830	3841	3851	3862	3873	3884	3895	3906	3917	3928	3939	3950	3961	3971	3982	3993	4004	4015	4026	4037	4048	4059	4070	4081	4091	4102	4113	4124
24	3776	3787	3798	3809	3820	3831	3841	3852	3863	3874	3885	3896	3907	3918	3928	3939	3950	3961	3972	3983	3994	4005	4015	4026	4037	4048	4059	4070	4081	4092	4102
25	3755	3766	3777	3788	3799	3810	3820	3831	3842	3853	3864	3875	3885	3896	3907	3918	3929	3940	3950	3961	3972	3983	3994	4005	4015	4026	4037	4048	4059	4070	4080
26	3734	3745	3756	3767	3777	3788	3799	3810	3821	3831	3842	3853	3864	3875	3885	3896	3907	3918	3929	3939	3950	3961	3972	3983	3993	4004	4015	4026	4037	4047	4058
27	3713	3724	3734	3745	3756	3767	3777	3788	3799	3810	3820	3831	3842	3853	3864	3874	3885	3896	3907	3917	3928	3939	3950	3960	3971	3982	3993	4004	4014	4025	4036
28	3691	3702	3713	3723	3734	3745	3756	3766	3777	3788	3798	3809	3820	3831	3841	3852	3863	3874	3884	3895	3906	3916	3927	3938	3949	3959	3970	3980	3992	4002	4013
29	3669	3680	3691	3701	3712	3723	3733	3744	3755	3765	3776	3787	3798	3808	3819	3830	3840	3851	3862	3872	3883	3894	3905	3915	3926	3937	3947	3958	3969	3979	3990
30	3647	3658	3668	3679	3689	3700	3711	3721	3732	3743	3753	3764	3775	3785	3796	3807	3817	3828	3839	3849	3860	3871	3881	3892	3903	3913	3924	3935	3945	3956	3967
31	3624	3635	3645	3656	3667	3677	3688	3699	3709	3720	3730	3741	3752	3762	3773	3784	3794	3805	3815	3826	3837	3847	3858	3869	3879	3890	3900	3911	3922	3932	3943
32	3601	3612	3622	3633	3644	3654	3665	3675	3686	3697	3707	3718	3728	3739	3750	3760	3771	3781	3792	3802	3813	3824	3834	3845	3855	3866	3877	3887	3898	3908	3919
33	3578	3588	3599	3610	3620	3631	3641	3652	3662	3673	3683	3694	3705	3715	3726	3736	3747	3757	3768	3778	3789	3799	3810	3821	3831	3842	3852	3863	3873	3884	3894
34	3554	3565	3575	3586	3596	3607	3617	3628	3638	3649	3659	3670	3680	3691	3701	3712	3722	3733	3743	3754	3764	3775	3786	3796	3807	3817	3828	3838	3849	3859	3870
35	3530	3540	3551	3561	3572	3582	3593	3603	3614	3624	3635	3645	3656	3666	3677	3687	3698	3708	3719	3729	3740	3750	3761	3771	3782	3792	3803	3813	3824	3834	3845

horizontale Achse: Druck in Torr
vertikale Achse: Temperatur in °C

8. BESTIMMUNG DES PH-WERTS

Elektrometrische Messung der H-Ionen-Aktivität einer Suspension von Boden in 0,01-molarer $CaCl_2$-Lösung und gegebenenfalls in destilliertem Wasser. Bei einer Bestimmung des pH-Werts in wässriger Aufschlämmung besteht eine Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis. Die Messung in 0,01 mol·L^{-1} $CaCl_2$-Lösung ist vom Mischungsverhältnis weitgehend unabhängig. Bei der Angabe des Ergebnisses ist die Art der Suspension (0,01 mol·L^{-1} $CaCl_2$ oder H_2O), in welcher der pH gemessen wurde, anzuführen.

Geräte

- Feinschnellwaage, auf 10 mg ablesbar oder Volumslöffel für 10 mL
- Becher aus Kunststoff, hohe Form (ca. 50 mL Volumen) oder entsprechende Reagenzgläser
- Messgefäß oder Dosiereinrichtung für 25 mL
- elektrometrisches pH-Meter mit Glaselektrode

Reagenzien

- aqua dest.
- 0,01 mol·L^{-1} $CaCl_2$-Lösung: 1,47 g $CaCl_2 \cdot 2\,H_2O$ p. a. in aqua dest. zu 1,000 L lösen
- Pufferlösungen zur Eichung des pH-Meters: es wird empfohlen, käufliche Lösungen gemäß Anweisungen des Geräteherstellers zu verwenden (z.B. Pufferlösung pH 4,0 und Pufferlösung pH 7,0)

Durchführung

Der Feinboden wird im Massen- oder Volumenverhältnis 1 : 2,5 (bei Humusböden 1 : 5) mit der 0,01 mol·L^{-1} $CaCl_2$-Lösung (oder aqua dest.) in einem Becherglas (Reagenzglas) versetzt (10 g oder 10 mL Boden und 25 mL Lösung), gut durchmischt und über Nacht stehen gelassen. Am nächsten Morgen durchmischt man neuerlich gut und lässt den Boden kurz absetzen. Bei hohen Genauigkeitsansprüchen ist die Absetzzeit zu standardisieren. Der pH-Wert wird mit dem pH-Meter gemessen, das mit den Pufferlösungen geeicht wurde. Der pH-Wert darf erst nach dem Erreichen des Stillstandes der Anzeige abgelesen werden. Gegebenenfalls ist eine Temperaturkorrektur vorzunehmen. Zwischen allen Messungen ist die Glaselektrode mit aqua dest. abzuspülen und – falls notwendig – mit säurefreiem Papier vorsichtig von eventuell vorhandenen hauchartigen Überzügen toniger Suspension zu reinigen.

Anmerkung

Die Zeit bis zur konstanten Anzeige ist im stark sauren Bereich relativ kurz. Sie steigt gegen den Neutralpunkt hin merklich an, ab welchem sich das Potenzial viel langsamer einstellt. Vorsicht vor Messfehlern durch zu frühen Abbruch der Messung!

9. BESTIMMUNG DER ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT

Die elektrische Leitfähigkeit κ ist ein Summenparameter für dissoziierte Stoffe (gelöste Salze). Ihre Größe hängt von der Konzentration und dem Dissoziierungsgrad der Ionen, von der Temperatur und von der Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen im elektrischen Feld ab. Bei Bodenuntersuchungen gibt die Leitfähigkeit Hinweise auf den Anteil löslicher Salze und somit auf das osmotische Potenzial und auf das landwirtschaftliche Nutzungspotenzial von Böden.
Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgt im wässrigen Bodenauszug. Die elektrische Leitfähigkeit ist zum Salzgehalt der Bodenlösung direkt proportional. Für größere Werte ist der Messbereich in Millisiemens je Zentimeter ($mS \cdot cm^{-1}$) zu wählen, für kleinere, für Bodenextrakte üblich Werte ist der Bereich Mikrosiemens pro Zentimeter ($\mu S \cdot cm^{-1}$) am Gerät einzustellen ($1\ S = 1\ \Omega = 1\ m^{-2} \cdot s^3 \cdot kg^{-1} \cdot A^2$).

Geräte und Reagenzien

- destilliertes bzw. entionisiertes Wasser
- Konduktometer (Messgerät für die elektrische Leitfähigkeit, mit Temperaturkompensation)
- Plastikbehälter, Plastiktrichter und Papierfilter
- Horizontalschüttler

Vorbereitung

Bei Wasserproben ist keine Vorbereitung notwendig. Bei Bodenproben erfolgt die Messung in Bodenextrakten. 1 Gewichtsteil Feinboden (Durchmesser < 2 mm) wird mit 5 Gewichtsteilen dest. Wasser (z. B. 20 g Boden, 100 mL H_2O) in 500-mL-Schüttelflaschen eingewogen, 2 Stunden geschüttelt und anschließend filtriert.

Durchführung

Die elektrische Leitfähigkeit κ hängt von der Temperatur ab und ist daher immer für eine Referenztemperatur t_{Ref} anzugeben (20 °C oder 25 °C), wobei die Referenz auszuweisen ist. κ wird am besten durch Eintauchen des Sensors in das Filtrat bei t_{Ref} gemessen. Das Konduktometer des Instituts ist allerdings temperaturkompensiert, sodass eine Korrektur bei abweichender Messtemperatur nicht notwendig ist. Bei Geräten ohne Kompensation ist die bei der aktuellen Temperatur gemessene Leitfähigkeit durch Multiplikation mit folgenden Faktoren auf die Leitfähigkeit bei der Referenztemperatur umzurechnen: $EC_{t\,Ref} = EC\,(t) \cdot f_{t\,Ref}$

Tabelle 9-1: Korrekturfaktor $f_{25°C}$ für die Messung von *EC* bei beliebiger Temperatur

Temperatur t / °C	16	17	18	19	20	21	22	23
Korrekturfaktor f	1,225	1,196	1,168	1,141	1,116	1,091	1,067	1,044
Temperatur t / °C	24	25	26	27	28	29	30	
Korrekturfaktor f	1,021	1,000	0,979	0,959	0,940	0,921	0,903	

10. HUMUSBESTIMMUNG DURCH NASSOXIDATION

Der Gehalt an organischer Substanz wird durch nasse Verbrennung mit Kaliumdichromat und Schwefelsäure bestimmt, wobei die organische Substanz oxidiert (C^0 zu C^{2+}), Kaliumdichromat reduziert (Cr^{6+} zu Cr^{3+}) wird. Das Verfahren entspricht etwa der ÖNORM L 1081 [1989].
Die Endbestimmung kann entweder maßanalytisch durch Titration des unverbrauchten Kaliumdichromats oder kolorimetrisch durch Bestimmung der Cr^{3+}-Färbung mit dem Photometer erfolgen (in unserem Labor wird nur erstere Methode angewandt, zweitere ist vollständigkeitshalber angeführt).
Diese Methode ist nur für Bestimmungen von Humus bis zu einer Obergrenze von 5 % geeignet, da darüber die Oxidation selbst bei externer Erhitzung zunehmend unvollständig abläuft.
Mit dieser Methode wird eigentlich der organische Kohlenstoff bestimmt. Der Wert für den Humusgehalt wird aus einer Umrechnung mit dem Faktor 1,72, welcher sich bei einer Annahme eines mittleren Kohlenstoffgehalts der organischen Substanz von 58 % ergibt, erhalten.

Geräte

für die Oxidation:
- Bechergläser
- Pipette oder Stepper
- Messkolben

für die titrimetrische Bestimmung:
- Titrator
- Goldelektrode
- Bezugselektrode

für die photometrische Bestimmung:
- Photometer

Reagenzien

Für die titrimetrische Bestimmung und Oxidation:
- 0,167 $mol \cdot L^{-1}$ Kaliumdichromatlösung (49,032 g $K_2Cr_2O_7$ in aqua dest. lösen und in einem Messkolben mit aqua dest. auf 1,000 L auffüllen)
- konz. Schwefelsäure; H_2SO_4 (95–97) %
- 1 m Ammoniumeisen(II)sulfatlösung (196,1 g $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6\,H_2O$ in 0,800 L Deionat lösen, 20,0 mL konz. H_2SO_4 zusetzen und mit Deionat in einem Messkolben auf 1,000 L auffüllen)
- 1/40 $mol \cdot L^{-1}$ Ferroinlösung (1,10-Phenanthrolin-Eisen(II)sulfat)

Für die photometrische Bestimmung und Oxidation:
- 0,33 $mol \cdot L^{-1}$ Kaliumdichromatlösung (98,06 g $K_2Cr_2O_7$ in Deionat lösen und in einem Messkolben auf 1,000 L mit Deionat auffüllen)
- konz. Schwefelsäure; H_2SO_4 (95–97) %
- myo-Inosit; $C_6H_{12}O_6$

Durchführung

Oxidation

In einem 400-mL-Becherglas werden, je nach zu erwartendem C-Gehalt, 0,5 g bis 2 g ofentrockener Feinboden (< 2 mm) eingewogen, mit 10,0 mL $K_2Cr_2O_7$-Lösung versetzt und vermischt. Im Abzug werden vorsichtig 20,0 mL konz. H_2SO_4 zugegeben, wobei sich die Mischung erwärmt und durch entweichendes CO_2 aufschäumt. Nach abermaligem Schwenken des Becherglases lässt man die Probe mindestens 30 min im Abzug stehen. Anschließend wird mit Deionat auf 0,2 L verdünnt.
Sicherheitshinweise: Es ist darauf zu achten, dass der Abzug eingeschaltet ist (Lüftungsschalter auf Stellung 2). Grundsätzlich sind beim Hantieren mit konz. H_2SO_4 Handschuhe und Schutzbrille zu tragen!

a) Titrimetrische Bestimmung

Das Becherglas wird auf den Titrator gestellt und mit der Ammoniumeisen(II)sulfatlösung titriert (Methode 5). Dabei kann Ferroinlösung als Indikator verwendet werden, um den Umschlagspunkt zu beobachten. Der Umschlag erfolgt von dunkelgrün nach rotbraun. Es ist darauf zu achten, dass die Einfüllöffnungen an der Bezugselektrode während der Messung geöffnet sind.
Pro Probendurchgang müssen ein oder zwei Blindwerte, bestehend aus sämtlichen Chemikalien, ohne Probe, mitgemessen werden. Wird bei einer Probe mehr als 75 % der $K_2Cr_2O_7$-Lösung verbraucht, ist diese mit geringerer Einwaage zu wiederholen.
Doppelbestimmungen werden grundsätzlich empfohlen. Die Probenlösungen müssen in einem Kanister, der speziell für Abfälle der C_{org}-Bestimmung bereit gehalten wird, gesammelt werden. Die Goldelektrode ist trocken, die Bezugselektrode mit geschlossenen Einfüllöffnungen in Deionat aufzubewahren. Es ist außerdem darauf zu achten, dass der Kolben des Titrators keine Luftblasen enthält. Sicherheitshalber sollte zu Beginn des Messdurchgangs ein oder zwei Mal die Titrierlösung durchgespült werden, wobei der Dosierschlauch in die Vorratsflasche taucht.

b) Photometrische Bestimmung

Der Oxidationsvorgang unterscheidet sich leicht von dem oben angegebenen und für die titrimetische Methode verwendeten.
Es wird nur mit 15,0 mL konz. H_2SO_4 versetzt und die Probe zwei bis drei Stunden stehen gelassen, bis sie auf Raumtemperatur abgekühlt ist. Anschließend wird mit 65 mL Deionat versetzt und das Becherglas über Nacht stehen gelassen, wobei sich die Probenteilchen vollständig absetzen.
Am nächsten Tag wird mit der Pipette 1,00 mL der überstehenden Probelösung entnommen und mit Deionat in einem Messkolben auf 25,0 mL verdünnt, wobei darauf zu achten ist, dass keine Bodenteilchen mit der Lösung aufgesaugt werden. Die Lösung wird bei 570 nm gemessen und mit der zu erstellenden Standardeichreihe unten (Tabelle 10-1) verglichen.

Tabelle 10-1: Eichreihe mit myo-Inosit (die Eichlösungen sind mehrere Wochen haltbar)

Kalibrierpunkt	Humusgehalt in %	myo-Inosit in mg
1	0	–
2	1	29
3	2	58
4	3	87
5	5	145

Auswertung

Titrimetrische Bestimmung

$$\frac{p\,(C_{org})}{\%} = \frac{0{,}003\times 100\times(A - A\times C/B)}{\text{g Einwaage}}$$

[A] = mL Vorlage an $K_2Cr_2O_7$-Lösung
[B] = mL Verbrauch an Ammoniumeisen(II)sulfatlösung für den Blindwert
[C] = mL Verbrauch an Ammoniumeisen(II)sulfatlösung für die Probe

Früher wurde der Formelwert noch mit dem Faktor 1,33 multipliziert (nach Walkley und Black [1934]), weil bei dieser Methode angeblich nur etwa 75 % des gesamten C-Gehalts erfasst wurden. Darauf ist beim Vergleich mit älteren Literaturdaten Bedacht zu nehmen.

Soll der Humusgehalt angegeben werden, muss das obige Ergebnis mit 1,724 multipliziert werden.

Photometrische Bestimmung

Die Ergebnisse werden, nach korrekter Eichung, vom Photometer in % Humus ausgegeben.

Theorie

Die Oxidation läuft nach folgender Reaktionsgleichung ab:

$$3\,C + Cr_2O_7^{2-} + 14\,H_3O^+ \rightleftharpoons 3\,C^{2+} + 2\,Cr^{3+}\,21\,H_2O$$

Der Titrationsprozess lässt sich durch folgende Reaktionsgleichung darstellen:

$$K_2Cr_2O_7 + 6\,FeSO_4 + 7\,H_2SO_4 \rightleftharpoons Cr_2(SO_4)_3 + 3\,Fe_2(SO_4)_3 + K_2SO_4 + 7\,H_2O\,.$$

11. GEHALT AN VERSCHIEDENEN N-FORMEN

11.1 Bestimmung des Gehalts an mineralisiertem Stickstoff

Unter dem mineralisierten Stickstoff (N_{min}) versteht man den in anorganischen Verbindungen vorliegenden. Er setzt sich aus Nitratstickstoff (NO_3^--N) und austauschbar gebundenem Ammoniumstickstoff (NH_4^+-N) zusammen.
Bei der vorliegenden Methode werden feldfrische Bodenproben mit einer schwachen Salzlösung extrahiert und der Nitrat- und Ammoniumgehalt des Filtrats bestimmt. Zur Berechnung der Ergebnisse wird der Wassergehalt des Bodens benötigt.
Die Bestimmung erfolgt gemäß ÖNORM L 1091 [1999].

Geräte

Für die Extraktion:
- Waage; ±0,1 g genau
- 1000-mL-Kunststoffbehälter mit Schraubverschluss (Gewicht soll bekannt sein)
- 250-mL-Kunststoffflaschen
- Horizontalschüttler
- Trichter
- N-freie Faltenfilter

Für die NO_3^--Bestimmung:
- siehe Bestimmung des Nitratgehalts nach Navonne
- Pipette

Für die NH_4^+-Bestimmung:
- siehe Bestimmung von Ammonium als Indophenol

Reagenzien

Für die Extraktion:
- 0,0125 mol·L^{-1} Calciumchlorid-Extraktionslösung (1,84 g $CaCl_2 \cdot 2\,H_20$ mit einigen Tropfen Chloroform versetzen und mit Deionat auf 1,000 L auffüllen)

Für die NO_3^--Bestimmung:
- siehe Bestimmung des Nitratgehalts nach Navonne
- 10 %ige Schwefelsäure (56,0 mL konz. H_2SO_4 mit 0,90 L Deionat verdünnen)

Für die NH_4^+-Bestimmung:
- siehe Bestimmung von Ammonium als Indophenol

Probenahme und -vorbereitung

Die Probenahme erfolgt mittels Bohrstock in mehreren Tiefenstufen (z. B.: (0–30) cm, (30–60) cm, (60–90) cm, usw.) und muss ein repräsentatives Muster des Feldes erfassen (15–20 Einstiche pro Parzelle).
Die Proben werden so zur Analyse gebracht, dass eine Veränderung des NO_3^-- und NH_4^+-N durch mikrobielle Umsetzung ausgeschlossen ist. Dazu werden sie in Kunststoffsackerl verpackt – möglichst unter Ausschluss von Luftsauerstoff – und gekühlt ins Labor transportiert. Noch besser ist es, Kunststoffbehälter (wie bei der Extraktion angegeben) vorzubereiten und die Einwaage der Proben direkt vor Ort durchzuführen.
Zur Bestimmung des Wassergehalts wird ein Teil der genommenen Proben in Papiersackerl eingewogen und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Das Gewicht muss vor und nach der Trocknung notiert werden.

Extraktion

Die 1000-mL-Kunststoffbehälter mit der Masse m_{Be} werden mit 0,60 L Extraktionslösung befüllt und abgewogen; die Masse $m_{BeLö}$ wird notiert. Anschließend werden etwa 150 g der naturfeuchten, homogenisierten Probe zugegeben und die Behälter abermals abgewogen und die Masse $m_{BeLöBo}$ (± 0,1 g genau) notiert. Es ist dabei darauf zu achten, dass der Deckel immer mitgewogen wird.
Die Behälter werden eine Stunde lang geschüttelt, der Inhalt kurz absetzen gelassen und in 250-mL-Kunststoffflaschen filtriert. Das Filtrat kann bis zu drei Tage gekühlt gelagert werden.
Alternativ kann auch mit 0,30 L Extraktionslösung und 75 mg Einwaage gearbeitet werden.

NO_3^--Bestimmung

Siehe Bestimmung des Nitratgehalts nach Navonne.
Da die NO_3^--Konzentration des Filtrats wesentlich niedriger ist als die im Bodenwasser üblicherweise gefundenen Werte, wird nicht mit dem Dilutor verdünnt. Es werden 19,25 mL des Filtrats mit 0,75 mL 10%iger H_2SO_4 in einem Proberöhrchen gut vermischt. Bei höheren NO_3^--Konzentrationen wird ein aliquoter Teil des Filtrats mit Extraktionslösung verdünnt. Auch der Standard muss verdünnt werden. Dazu und für den Blindwert wird ebenfalls die Extraktionslösung verwendet.
Bei der photometrischen Messung wird die Methode und das Standardfile „NITB“ verwendet.

NH_4^+-Bestimmung

Siehe Bestimmung von Ammonium als Indophenol.
Zum Verdünnen des Standards und für den Blindwert muss die Extraktionslösung verwendet werden.
Bei der photometrischen Messung wird die Methode und das Standardfile „AMMB“ verwendet.

Berechnung

Mit einem Teil der Probe wird der Massenwassergehalt w nach Kapitel 1.1 bzw. ÖNORM L 1062 [1988] ermittelt und daraus die Feststoffmasse bzw. die Trockensubstanz des zur Stickstoffbestimmung eingewogenen Bodens berechnet.

Für die photometrische Bestimmung der Massenkonzentration muss das Volumen der Extraktionslösung V_{Ex} bekannt sein. Die Masse des Extrakts m_{Ex} besteht aus der Masse der Extraktionslösung

$m_{Lö}$ und der Wassermasse m_w der feuchten Bodenprobe (und enthält also nicht die Feststoffmasse der Bodeneinwaage): $m_{Ex} = m_{Lö} + m_w$.

$[m_{Ex}]$ = g Masse des Extrakts
$[m_{Lö}]$ = g Masse der Extraktionslösung im Behälter:
$m_{Lö} = m_{BeLö} - m_{Be}$
$[m_{BeLö}]$ = g Masse des Behälters mit Extraktionslösung
$[m_{Be}]$ = g Masse des Behälters
$[m_w]$ = g Wassermasse der feuchten Bodeneinwaage

Die Einwaage bzw. die Masse der feuchten Bodenprobe m_{s+w} ergibt sich aus

$$m_{s+w} = m_{BeLöBo} - m_{BeLö}$$

$[m_{s+w}]$ = g Einwaage; Masse der feuchten Bodenprobe
$[m_{BeLöBo}]$ = g Masse des Behälters mit Extraktionslösung und Boden

Wenn man die Bodeneinwaage bzw. Masse der feuchten Bodenprobe m_{s+w} und den Massenwassergehalt w kennt, ergibt sich die Wassermasse m_w der Bodenprobe aus der Formel 2-4

$$m_w = w \cdot m_s = m_{s+w} \cdot \frac{w}{1+w} = (m_{BeLöBo} - m_{BeLö}) \cdot \frac{w}{1+w}.$$

$[w]$ = $g \cdot g^{-1}$ (separat bestimmter) Massenwassergehalt der Bodenprobe
$[m_s]$ = g Feststoff- bzw. Trockenmasse der eingewogenen feuchten Bodenprobe
$[m_{s+w}]$ = g Einwaage; Masse der feuchten Bodenprobe

Setzt man die Dichte beider Flüssigkeiten mit der von Wasser an, lässt sich das Volumen des Extrakts V_{Ex} wie folgt berechnen: $V_{Ex} = \frac{m_{Ex}}{\rho_{Ex}} = \frac{m_{Lö} + m_w}{\rho_w}$

$$\boxed{V_{Ex} = \frac{m_{BeLö} - m_{Be} + (m_{BeLöBo} - m_{BeLö}) \cdot \frac{w}{1+w}}{\rho_w}}.$$

$[V_{Ex}]$ = mL Volumen des Extrakts, wobei dem Extrakt die Dichte von Wasser unterstellt wird: $\rho_{Ex} = \rho_w = 1{,}00$ g/mL
$[m_{BeLö}]$ = g Masse des Behälters mit Extraktionslösung
$[m_{Be}]$ = g Masse des Behälters
$[m_{BeLöBo}]$ = g Masse des Behälters mit Extraktionslösung und feuchtem Boden
$[\rho_w]$ = $g \cdot mL^{-1}$ Dichte von Wasser; wird mit $\rho_w = 1{,}00$ g/mL angenommen

Die Feststoffmasse erhält man mittels Gl. 2-2 $m_s = \frac{m_{s+w}}{1+w}$

aus $$\boxed{m_s = \frac{m_{BeLöBo} - m_{BeLö}}{1+w}}.$$

Das Photometer gibt den Nitratgehalt als Massenkonzentration bzw. Partialdichte $c(NO_3^-)$ in mg/L an. Die Werte der zweiten NO_3^--Messung müssen, außer wenn sie negativ sind, von jenen der ersten abgezogen werden.
Für die Angabe des Nitratgehalts im Boden $p(NO_3^-)$ als Massenanteil wird die Nitratmasse $m(NO_3^-)$ auf die Feststoffmasse m_s bezogen

$$p(NO_3^-) = \frac{m(NO_3^-)}{m_s},$$

wobei die Nitratmasse das Produkt aus der Nitratkonzentration $c(NO_3^-)$ und dem Extraktvolumen V_{Ex} ist

$$p(NO_3^-) = \frac{c(NO_3^-)\cdot V_{Ex}}{m_s}.$$

Möchte man den Nitratgehalt in der Einheit mg pro 100 g trockenem Boden angeben – also $[p(NO_3^-)] = mg\cdot hg^{-1} \equiv 10^{-3}\,g/(10^2\,g) \equiv 10^{-5}\,g\cdot g^{-1}$ –, ist folgende zugeschnittene Größengleichung zu verwenden

$$\frac{p(NO_3^-)}{mg\cdot hg^{-1}} = \frac{\dfrac{c(NO_3^-)}{mg\cdot L^{-1}}\cdot\dfrac{V_{Ex}}{mL}}{\dfrac{m_s}{g}}\cdot\frac{mg\cdot L^{-1}\cdot mL}{g\cdot mg\cdot hg^{-1}}$$

$$\frac{p(NO_3^-)}{mg\cdot hg^{-1}} = \frac{\dfrac{c(NO_3^-)}{mg\cdot L^{-1}}\cdot\dfrac{V_{Ex}}{mL}}{\dfrac{m_s}{g}}\cdot 10^{-3}\cdot g\cdot L^{-1}\cdot 10^{-3}\cdot L\cdot g^{-1}\cdot 10^{3}\cdot g^{-1}\cdot 10^{2}\cdot g$$

$$\frac{p(NO_3^-)}{mg\cdot hg^{-1}} = \frac{\dfrac{c(NO_3^-)}{mg\cdot L^{-1}}\cdot\dfrac{V_{Ex}}{mL}}{\dfrac{m_s}{g}}\times 10^{-1}.$$

Die relative Atommasse von Stickstoff ist $A_r(N) = 14{,}0067$ und die relative Masse des Nitrations $m_r(NO_3^-) = 14{,}0067 + 3\times 15{,}999 = 62{,}0037$. Der Massenanteil des Stickstoffs am Nitrat beträgt $p = 14{,}0067/62{,}0037 = 0{,}226$ bzw. auf drei signifikante Stellen hinreichend genau 14/62 = 7/31. Für den als Nitrat vorliegenden Stickstoffgehalt im Boden als Massenanteil erhält man damit

$$\boxed{\frac{p(N_{NO3-})}{mg\cdot hg^{-1}} = \frac{\dfrac{c(NO_3^-)}{mg\cdot L^{-1}}\cdot\dfrac{V_{Ex}}{mL}}{\dfrac{m_s}{g}}\times\frac{7}{310}}.$$

$[p(N_{NO3-})] = mg\cdot hg^{-1}$ Stickstoffgehalt aus NO_3^- im Boden in der Einheit mg NO_3^--N /100 g Boden

$[c(NO_3^-)] = mg\cdot L^{-1}$ NO_3^--Massenkonzentration in mg/L

Die Ammoniumkonzentration $c(NH_4^+)$ wird vom Photometer ebenfalls in der Einheit mg /L angegeben. Daraus wird der NH_4^+-Gehalt des Bodens folgendermaßen berechnet:

$$\frac{p(NH_4^+)}{mg\cdot hg^{-1}} = \frac{\dfrac{c(NH_4^+)}{mg\cdot L^{-1}}\cdot\dfrac{V_{Ex}}{mL}}{\dfrac{m_s}{g}}\times 10^{-1}$$

und der als Ammonium vorliegende Stickstoffgehalt im Boden (der Massenanteil des Stickstoffs am Ammonium beträgt 14/18 = 7/9)

$$\boxed{\frac{p(N_{NH4+})}{mg\cdot hg^{-1}} = \frac{\dfrac{c(NH_4^+)}{mg\cdot L^{-1}}\cdot\dfrac{V_{Ex}}{mL}}{\dfrac{m_s}{g}}\times\frac{7}{90}}.$$

$[p\,(N_{NH4+})] = mg \cdot hg^{-1}$ Stickstoffgehalt aus NH_4^+ im Boden in der Einheit mg NH_4^+-N /100 g Boden

$[c\,(NH_4^+)] = mg \cdot L^{-1}$ NH_4^+-Massenkonzentration in mg/L

Aus den letzten beiden Ergebnissen wird der Gesamtstickstoffgehalt berechnet:

$$p\,(N_{ges}) = p\,(N_{NO3-}) + p\,(N_{NH4+})$$

$$\frac{p\,(N_{ges})}{mg \cdot hg^{-1}} = \frac{\frac{V_{Ex}}{mL}}{\frac{m_s}{g}} \cdot \left(\frac{c\,(NO_3^-)}{mg \cdot L^{-1}} \times \frac{7}{310} + \frac{c\,(NH_4^+)}{mg \cdot L^{-1}} \times \frac{7}{90} \right).$$

$[p\,(N_{ges})] = mg \cdot hg^{-1}$ Gesamtstickstoffgehalt aus NH_4^+ im Boden (NO_3^--N und NH_4^+-N) in der Einheit mg N_{ges} /100 g Boden

11.2 Bestimmung des Ammoniumgehalts als Indophenol

Ammonium NH_4 reagiert mit aktivem Chlor (Dichlorisocyanursäure $C_3O_3N_3Cl_2$) zu Monochloramin (NH_2Cl). Im alkalischen Milieu (pH (12−13)) oxidiert dieses mit Salicylat (Natriumsalicylat $NaC_7H_5O_3$) zu Benzochinon-monoimin (diese Reaktion wird von Natrium-Nitroprussid $C_5FeN_4Na_3O$ katalysiert), welches durch eine Reaktion mit weiterem Salicylat grün gefärbtes Indophenol bildet. Die Konzentration kann photometrisch bei einer Wellenlänge von 660 nm gemessen werden.

Geräte

- Bechergläser
- Messkolben
- Proberöhrchen und Ständer
- Pipette und Stepper
- Spektralphotometer mit Sampler

Reagenzien

- 0,3 $mol \cdot L^{-1}$ Natronlauge (12 mg NaOH mit Deionat auf 1,000 L auffüllen)
- Nitroprussid-Salicylatlösung, bezeichnet als Lösung A (0,12 g Na-Nitroprussid und 17 g Natriumsalicylat in 200 mL Deionat lösen, 0,100 L einer 0,3 $mol \cdot L^{-1}$ NaOH-Lösung dazu geben)
- Dichlorisocyanursäure-Lösung, bezeichnet als Lösung B (0,1 g Dichlorisocyanursäure-Natriumsalz in 0,100 L Deionat lösen)
- 0,100 g/L Ammonium-Standard-Stammlösung (296,5 mg NH_4Cl auf 1,000 L mit Deionat; siehe auch: Herstellung und Verwendung von Standards)
- 3,0 mg/L Ammonium-Standard-Arbeitslösung (3,00 mL der Stammlösung mit Deionat auf 0,100 L verdünnen)

Probenvorbereitung

5,00 mL der Probe werden mit 2,50 mL Lösung A und 1,00 mL Lösung B versetzt, gut gemischt und 15 min stehen gelassen, damit sich ein Gleichgewicht in der Lösung einstellen kann. Wenn die Konzentration der Probe zu hoch ist, muss ein aliquoter Teil mit Deionat verdünnt werden.
Vor und nach den Probelösungen sollen je drei Blindwerte, bestehend aus Deionat und zwei Standards vorbereitet werden. Blindwerte und Standards werden wie Proben behandelt.
Der Farbkomplex ist acht Stunden stabil.

Messung

Bedienung des Photometers: siehe Photometer-Schritt-für-Schritt-Anleitung.
Sowohl als Methode, als auch für die Standard-Eichkurve soll das File „AMMW" gewählt werden. Mit den ersten drei Blindwerten wird die Nulllinie geeicht und mit den Standards die Vorbereitung überprüft. Ihre Werte sollten zwischen 2,8 mg/L und 3,2 mg/L liegen.

Auswertung

Das Photometer gibt die Ammoniumkonzentration $c\,(NH_4^+)$ in der Einheit mg/L an.

11.3 Bestimmung des Gehalts an Gesamtstickstoff

Bei der Methode nach Kjehldahl wird organisch gebundener Stickstoff durch Aufschluss mit heißer, konzentrierter Schwefelsäure unter Anwesenheit eines Katalysatorgemisches in Ammonium umgewandelt. Durch alkalische Destillation und anschließende Titration wird das Ammonium bestimmt.
Der anorganisch gebundene Stickstoff wird dabei nicht vollständig erfasst, nur der bereits als Ammonium vorliegende Teil. Um Nitrat und Nitrit auch zu bestimmen, muss eine erweitere Methode angewandt werden (siehe Vorschrift: „Bestimmung von N_{ges} unter Einschluss von NO_3^- und NO_2").

Geräte

- Analysenwaage
- Aufschlusskolben
- Heizblock mit Absaugung
- Wasserdampfdestillator
- Titrator mit Glaselektrode
- Bechergläser

Reagenzien

- konz. Schwefelsäure, H_2SO_4 (95–97) %
- Siedesteinchen
- MERCK Katalysatortabletten (2,8 % Titanoxid, 1,8 % Kupfersulfat, 47,7 % Kaliumsulfat, 47,7 % Natriumsulfat)
- Natronlauge, 32 % (470 g NaOH + 1,000 L Deionat)
- Borsäure, 2 % (20 g H_3BO_3 auf 1,000 L Deionat)

- Mischindikator 5, für Ammoniaktitration
- Salzsäure in der Konzentration 0,01 mol·L^{-1} oder 0,05 mol·L^{-1} (Titrisol)

Durchführung des Aufschlusses

Es werden je 0,5 g bis 2 g ofentrockene Boden- oder Pflanzenprobe in einen Aufschlusskolben eingewogen (m_s auf ±0,0001 g genau). Dazu werden 2 Siedesteinchen, eine Katalysatortablette und vorsichtig 20,0 mL konz. H_2SO_4 gegeben. Nach der H_2SO_4-Zugabe werden die Kolben geschwenkt bis alles gut durchmischt ist. Es ist einige Minuten zu warten, dabei kann es bei kalkhaltigen Böden zu leichtem Schäumen kommen. Danach wird noch einmal kurz geschwenkt, die Proben auf den Heizblock gestellt, der auf 360 °C aufgeheizt wurde, die Absaugung aufgesetzt und mindestens 2 Stunden gekocht, besser bis keine weißen Dämpfe mehr aufsteigen und die überstehende Lösung grünlich klar ist. Die Kolben können auch schon vor Erreichen von 360 °C auf den Heizblock gestellt werden, mit dem Zählen der 2 Stunden muss jedoch gewartet werden, bis die endgültige Temperatur erreicht wurde. Die Proben müssen vor der Destillation auskühlen.

Destillation und Titration

Der Aufschlusskolben und ein Becherglas mit 20,0 mL H_3BO_3 und Mischindikator werden auf die jeweils vorgesehenen Plätze in der Destillationsapparatur gestellt und das Analyseprogramm ablaufen gelassen. (10 s H_2O ≈ 100 mL, 8 s NaOH ≈ 80 mL, 30 s warten, 480 s destillieren mit 75-%iger Dampfleistung, 30 s absaugen).
Anschließend wird das Becherglas auf den Titrator gestellt und die H_3BO_3 mit der HCl titriert (Methode 2).
Ein Blindwert, der ebenso wie die Probe behandelt wurde, muss zuvor gemessen (Methode 1) und vom Probenwert abgezogen werden. (Für die Handhabung und Reinigung des Destillators zu Beginn des Arbeitstages siehe die Vorschrift: „Vorbereitung des Destillators“).
Nach dem Durchlauf aller Proben muss mind. einmal das Spülprogramm laufen gelassen werden.

Auswertung

1 mL einer 0,01 mol·L^{-1} HCl entspricht 0,14 mg N. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$p\,(\mathrm{N_{ges}}) = \frac{\left(\frac{V_{\text{titr Probe}}}{\text{mL}} - \frac{V_{\text{titr BW}}}{\text{mL}}\right) \times \text{m HCl} \times 1{,}4}{\frac{m_s}{\text{g}}}$$

[$p\,(\mathrm{N_{ges}})$] = mg·hg^{-1} Stickstoffgehalt im Boden in der Einheit mg NH_4^+-N /100 g Boden
[Gesamt-N] = hg·g^{-1} Gesamtstickstoff in Massenprozent
* ..... Der Titrator zieht bei Methode 2 automatisch den vorher titrierten Blindwert ab.

Das Ergebnis wird als prozentualer Massenanteil auf zwei signifikante Stellen angegeben, wobei die Stickstoffmasse auf die Masse des lufttrockenen oder ofentrockenen Feinbodens bezogen wird. Die Bezugsbasis und die Bestimmungsmethode sind anzugeben (ÖNORM L 1082 [1989]).

11.4 Bestimmung des Nitratgehalts nach Navonne

Im angesäuerten Milieu absorbiert Nitrat (NO_3^-) Licht im UV-Bereich. Konkret wird bei dieser Methode eine Wellenlänge von 210 nm verwendet. Allerdings absorbieren in diesem Bereich ebenso einige organische Substanzen, wie Huminsäuren. Dadurch werden zwei Messungen notwendig, wobei bei der ersten Messung sowohl Nitrat als auch die störenden Substanzen, bei der zweiten nur letztere gemessen werden. Die Erfassung von Nitrat bei der zweiten Messung wird dadurch verhindert, dass es durch die Zugabe von verkupferten Zinkgranalien reduziert wird.

Geräte

- Dilutor
- Bechergläser
- Messkolben
- Proberöhrchen und Ständer
- Spektralphotometer mit Sampler
- Horizontalschüttler

Reagenzien

- konzentrierte Schwefelsäure; H_2SO_4 (95–97) %
- verdünnte Schwefelsäure (4,5 mL konz. H_2SO_4 auf 2 L mit Deionat)
- 5 %ige Kupfersulfatlösung (50 g $CuSO_4$ mit Deionat auf 1,000 L)
- verkupferte Zinkgranalien (1,00 kg Zinkgranalien in einer großen Schüssel mit 0,500 L H_2O und wenigen mL konz. H_2SO_4 so lange rühren, bis die Oberfläche blank ist; gut mit Wasser und Deionat spülen; 0,500 L Deionat und 0,250 L $CuSO_4$-Lösung zugeben und warten, bis das Zink vollständig mit einer schwarzen Schicht umgeben ist; mit Deionat spülen; an der Luft trocknen und in einem verschlossenen Gefäß aufbewahren)
- 100 mg/L Nitrat-Standard (163,1 mg KNO_3 auf 1,000 L mit Deionat; siehe auch: Herstellung und Verwendung von Standards)

Probenvorbereitung

Die Vorbereitung ist mit dem Einschalten des Photometers so abzustimmen, dass die UV-Lampe nicht wesentlich länger, aber keinesfalls kürzer als 1/2 Stunde aufwärmt. Es ist darauf zu achten, dass nur Proberöhrchen verwendet werden, in denen sich keine Reste der Zinkgranalien befinden. Sind schwarze Flecken an der Innenwand zu sehen, müssen die Röhrchen noch einmal gewaschen werden.

Die Proben werden mit dem Dilutor verdünnt. Idealerweise sollten die gemessenen Extinktionen zwischen 0,5 und 1,5 liegen (die Extinktion – im Photometer mit „Abs“ bezeichnet – ist wie die Absorption ein Maß für die Abschwächung einer Strahlung beim Durchgang durch Materie: $E_\lambda = -\log(I / I_0)$). Für die in der Praxis auftretenden Gehalte gibt es im Dilutor die in der Tabelle 11-1 angeführten Programme.

Tabelle 11-1: Dilutor-Programme zur Verdünnung der mit konz. Schwefelsäure versetzten Proben

Nr.	Verdünnung	Anwendungen für 20 mL	Nr.	Verdünnung	Anwendungen für 20 mL
30	1:10	4×	34	1:200	1×
31	1:25	1×	35	1:300	1×
32	1:50	1×	36	1:400	1×
33	1:100	1×			

Vor und nach den Probelösungen sollen je drei Blindwerte, das sind wie die Proben behandeltes Deionat, und zwei Standards – ebenfalls wie die Proben verdünnt – vorbereitet werden.

Durchführung

Erste Messung

(Bedienung des Photometers siehe: Photometer-Schritt-für-Schritt-Anleitung)
Sowohl als Methode, als auch für die Standard-Eichkurve soll das File „NITW“ gewählt werden. Mit den ersten drei Blindwerten wird die Nulllinie geeicht und mit den Standards die Vorbereitung überprüft. Ihre Werte sollten zwischen 95 mg/L und 105 mg/L liegen.

Reduktion

In jedes Röhrchen werden je zwei Zinkgranalien gegeben, der Ständer auf den Schüttler gestellt und etwa 20 min geschüttelt. Danach wird mindestens 8 Stunden, besser aber über Nacht gewartet und dann die 2. Messung durchgeführt.

Zweite Messung

Siehe 1. Messung. Die Standards sollten einen Wert um 0 mg/L ergeben.

Berechnung

Das Photometer gibt den Gehalt an NO_3^- in mg/L an. Die Werte der zweiten Messung müssen, außer wenn sie negativ sind, von jenen der ersten abgezogen werden.

12. ANHANG

12.1 Viskosität von Wasser

Die dynamische Viskosität von Fluiden ist eine stark temperatur- und schwach druckabhängige Stoffgröße.
Die dynamische Viskosität von Wasser wird weltweit für die Eichung von Viskosimetern herangezogen und wurde daher in einem Technical Report der ISO [ISO/TR 3666, 1998] genormt. Die dynamische Viskosität η von frischem, doppelt destilliertem Wasser bei 20 °C und einem Druck der Normatmosphäre von 0,101325 MPa beträgt

$$\eta = 1{,}0016\ \text{mPa·s}$$

Der zugehörige relative Fehler dieses Wertes beträgt dem Report zufolge ±0,17 %.
Weiters sind in einer Tabelle relative Viskositätswerte für verschiedene Temperaturen zusammengestellt, die sich auf den Normwert der Viskosität bei 20 °C beziehen. Die absoluten Werte wurden daraus selbst errechnet.

Tabelle 12-1: Relative dynamische Viskosität $\eta_{rel} = \eta(t)/\eta(20\,°C)$ von reinem Wasser bei verschiedenen Temperaturen [ISO/TR 3666, 1998] sowie absolute Werte

Temperatur t / °C	relative dynamische Viskosität $\eta_{rel} = \eta(t)/\eta(20\,°C)$	dynamische Viskosität $\eta(t)$ / (mPa·s)
15	1,1360 ± 0,0006	1,1378
20	1,000000	1,0016
23	0,9306 ± 0,0004	0,9321
25	0,8885 ± 0,0003	0,8899
30	0,7958 ± 0,0003	0,7971
40	0,6514 ± 0,0002	0,6524

Für Temperaturen t, die nicht explizit im Technical Report der ISO angeführt sind, ist zur Bestimmung von $\eta(t)$ eine Interpolation der Tabellenwerte erforderlich.
Möchte man die Viskosität in der Einheit mPa·s auf drei Nachkommastellen genau angeben – was gemäß ISO/TR durchaus gerechtfertigt ist –, genügt eine einfache Linearinterpolation nicht. Stattdessen ist in Betracht zu ziehen, dass die Temperatur und die dynamische Viskosität nach den Gesetzmäßigkeiten der Natur in funktionalem Zusammenhang stehen, der für die Interpolation benutzt werden kann.

Für Flüssigkeiten im Bereich 0 °C < t < 100 °C (t in °C) bzw. 273,15 K < T < 373,15 K (T in K) kann man laut Truckenbrodt [1980] ansetzen:

$$\frac{\eta}{\eta_b} = \frac{\exp\left(\frac{T_A}{T + T_B}\right)}{\exp\left(\frac{T_A}{T_b + T_B}\right)} \quad \text{bzw.} \quad \eta = \eta_b \cdot \exp\left(\frac{T_A}{T + T_B} - \frac{T_A}{T_b + T_B}\right)$$

$[\eta]$ = Pa·s Dynamische Viskosität bei gegebener Temperatur

$[\eta_b]$ = Pa·s Bezugsgröße, dynamische Viskosität bei gewählter Bezugstemperatur T_b
$[T_A]$ = K Konstante, aus Messungen ermittelt für Wasser: $T_A = 506\,K$
$[T_B]$ = K Konstante, aus Messungen ermittelt für Wasser: $T_B = -150\,K$
$[T]$ = K vorgegebene Temperatur
$[T_b]$ = K Bezugstemperatur

Für die (gewählte) Bezugstemperatur $T_b = 0\,°C$ bzw. 273,15 K gibt Truckenbrodt einen Wert von $\eta_b = 179{,}3\times10^{-5}$ Pa·s an. Für die dynamische Viskosität des Wassers bei einer beliebigen Temperatur folgt hierfür:

$$\eta = 179{,}3\times10^{-5}\cdot\exp\left(\frac{506}{T/\mathrm{K}-150}-\frac{506}{273{,}15-150}\right)$$

$[\eta]$ = Pa·s dynamische Viskosität bei gegebener Temperatur
$[T]$ = K vorgegebene Temperatur

Da die Temperatur für die Werte in der ISO/TR 3666 angegeben sind, in der obigen Formel jedoch Kelvin einzusetzen sind, ist folgende Umrechnung nach ON V 118 [1996] vorzunehmen:

$$\frac{T}{\mathrm{K}}=\frac{t}{°\mathrm{C}}+273{,}15 \qquad 1\,°C = 1\,K \text{ (exakt)}$$

$[t]$ = °C Temperatur in Grad Celsius
$[T]$ = K Temperatur in Kelvin

Tabelle 12-2: dynamische Viskosität von Wasser nach Truckenbrodt [1980]

t / °C	15	20	23	25	30	40
η / (mPa·s)	1,1477	1,0099	0,9392	0,8963	0,8017	0,6548

Vergleicht man diese Werte mit jenen aus dem Technical Report der ISO, muss man feststellen, dass die Genauigkeit zumindest der Modellparameter unzureichend ist.

Um eine bessere Übereinstimmung zu erzielen, wird nun zwar die Modellbeziehung von Truckenbrodt verwendet, jedoch als Bezugstemperatur $t = 20\,°C$ und als Bezugswert für die dynamische Viskosität $\eta_b = 1{,}0016\times10^{-3}$ Pa·s aus ISO/TR 3666 gewählt. Die Werte für die beiden Konstanten T_A und T_B werden nicht von Truckenbrodt übernommen, sondern als variable Parameter betrachtet und aus einer Optimierung an die gegebenen Werte der ISO/TR 3666 bestimmt, wobei die unterschiedlichen Standardabweichungen für die Tabellenwerte unberücksichtigt bleiben (es wird angenommen, dass alle sechs Werte dieselbe absolute Genauigkeit besitzen). Die entsprechende Optimierung ergab folgende Parameterwerte (zwei Nachkommastellen sind ausreichend):

$T_A = 463{,}19\,K$
$T_B = -155{,}76\,K$

Mit diesen Werten für T_A und T_B erhält man folgende Beziehung in Anlehnung an Truckenbrodt [1980]:

$$\eta = 100{,}16\times10^{-5}\cdot\exp\left(\frac{463{,}19}{T/\mathrm{K}-155{,}76}-\frac{463{,}19}{273{,}15+20-155{,}76}\right)$$

bzw.

$$\boxed{\eta = 1{,}0016\cdot\exp\left(\frac{463{,}19}{t+117{,}39}-\frac{463{,}19}{137{,}39}\right)}. \qquad (12\text{-}1)$$

$[\eta]$ = mPa·s ≡ $g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ dynamische Viskosität bei gegebener Temperatur
$[t]$ = °C Temperatur in Grad Celsius

Tabelle 12-3: η aus der optimierten Modellbeziehung in Anlehnung an Truckenbrodt [1980] und die hierfür herangezogenen Werte aus ISO/TR 3666

t / °C	15	20	23	25	30	40
η / (mPa·s) aus Modell	1,1376	1,0016	0,9320	0,8898	0,7968	0,6526
η / (mPa·s) aus ISO/TR 3666	1,1378	1,0016	0,9321	0,8899	0,7971	0,6524

Die Funktionswerte dieser optimierten Modellbeziehung weichen von den in der ISO/TR 3666 gegebenen Werten um weniger als 4×10^{-4} mPa·s ab. Sie liefert daher für drei Nachkommastellen ausreichend genaue Interpolationswerte für die dynamische Viskosität von reinem Wasser bei einer Temperatur im Bereich 18 °C ≤ t ≤ 30 °C.

12.2 Dichte von Wasser

Tanaka et al. [2001] haben Ergebnisse von neueren Experimenten zur Bestimmung der Dichte von Wasser analysiert und an diese eine Beziehung $\rho_w(t)$ angepasst, die von Thiesen schon im Jahre 1900 verwendet wurde. Demzufolge lässt sich die Dichte von reinem, entlüftetem Wasser in der Isotopenzusammensetzung von SMOW (= Standard Mean Ocean Water) unter einem Normdruck von p_0 = 101325 Pa durch folgende Funktion hochgenau angeben:

$$\rho_w(t) = a_5 \cdot \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 \cdot (t + a_2)}{a_3 \cdot (t + a_4)} \right]. \qquad 0\,°C \le t \le 40\,°C \qquad (12\text{-}2)$$

$[\rho_w(t)]$ = $kg \cdot m^{-3}$ Dichte von reinem, luftfreiem Wasser in der Isotopenzusammensetzung von SMOW bei p_0 = 101325 Pa
$[t]$ = °C Temperatur

Die aus der Anpassung ermittelten Parameterwerte betragen

$[a_1]$	= °C	Koeffizient;	a_1/°C = −3,983035
$[a_2]$	= °C	Anpassungskoeffizient;	a_2/°C = 301,797
$[a_3]$	= $°C^2$	Anpassungskoeffizient;	a_3/$°C^2$ = 522528,9
$[a_4]$	= °C	Anpassungskoeffizient;	a_4/°C = 69,34881
$[a_5]$	= $kg \cdot m^{-3}$	Koeffizient;	a_5/($kg \cdot m^{-3}$) = 999,974950.

Tanaka et al. geben zwar keinen Gültigkeitsbereich für die Formel selbst an, doch ist ein solcher sogar im Titel ihres Artikels angeführt. Dieser wird daher auch der Formel 12-2 unterstellt. Die beiden Koeffizienten a_1 und a_5 haben einen physikalischen Hintergrund: $-a_1$ ist die Temperatur, bei der das Dichtemaximum auftritt und a_5 die Dichte unter einem Druck von 10^5 Pa bei dieser Temperatur. Die Werte, die man mit der Formel 12-2 erhält, können der Tabelle 12-4 entnommen werden (allerdings in der Einheit $g \cdot cm^{-3}$). Sie weichen um maximal 0,01 $kg \cdot m^{-3}$ von den Normwerten des ISO/TR 3666 [1998] ab.

Darüber hinaus haben Tanaka et al. [2001] auch den Unterschied in der Dichte zwischen SMOW und Leitungswasser aufgrund eventuell abweichender Isotopenzusammensetzung (Verhältnisse $[^{18}O]/[^{16}O]$ und [D]/[H]) beschrieben. Weiters geben sie auch den Dichteunterschied zu luftgesättig-

tem Wasser durch folgende Formel an:

$$\Delta\rho_w(t) = s_0 + s_1 \cdot t \qquad 0\,°C < t < 25\,°C$$

$[\Delta\rho_w(t)] = kg \cdot m^{-3}$ Differenz zwischen der Dichte von luftgesättigtem Wasser und entlüftetem Wasser
$[s_0] = kg \cdot m^{-3}$ Koeffizient; empirisch ermittelt: $s_0/(kg \cdot m^{-3}) = -4{,}612 \times 10^{-3}$
$[s_1] = kg \cdot m^{-3} \cdot °C^{-1}$ Koeffizient; empirisch ermittelt: $s_1/(kg \cdot m^{-3} \cdot °C^{-1}) = 0{,}106 \times 10^{-3}$
$[t] = °C$ Temperatur

Ebenso interessant ist die Auswirkung der Kompressibilität auf die Dichte von Wasser. Die Dichte bei einer Atmosphäre (101325 Pa) ist gemäß der Autoren mit dem Faktor

$$[1 + (k_0 + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2) \cdot \Delta p] \qquad 0\,°C \le t \le 40\,°C$$

$[\Delta p] = Pa$ Differenz zwischen dem herrschenden Druck und dem Standardwert $p_0 = 101325$ Pa

zu multiplizieren, wobei für die einzelnen Faktoren folgende Werte ermittelt wurden:

$[k_0] = Pa^{-1}$ Koeffizient; empirisch ermittelt: $k_0/(Pa^{-1}) = 50{,}74 \times 10^{-11}$
$[k_1] = Pa^{-1} \cdot °C^{-1}$ Koeffizient; empirisch ermittelt: $k_1/(Pa^{-1} \cdot °C^{-1}) = -0{,}326 \times 10^{-11}$
$[k_2] = Pa^{-1} \cdot °C^{-2}$ Koeffizient; empirisch ermittelt: $k_2/(Pa^{-1} \cdot °C^{-2}) = 0{,}00416 \times 10^{-11}$.

Tabelle 12-4: Dichte von Wasser $\rho_w(t)$ in $g \cdot cm^{-3}$, t in °C

t/°C	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
16	0,99895	0,99893	0,99891	0,99890	0,99888	0,99886	0,99885	0,99883	0,99881	0,99880
17	0,99878	0,99876	0,99874	0,99873	0,99871	0,99869	0,99867	0,99865	0,99864	0,99862
18	0,99860	0,99858	0,99856	0,99854	0,99852	0,99850	0,99849	0,99847	0,99845	0,99843
19	0,99841	0,99839	0,99837	0,99835	0,99833	0,99831	0,99829	0,99827	0,99825	0,99823
20	0,99821	0,99819	0,99817	0,99814	0,99812	0,99810	0,99808	0,99806	0,99804	0,99802
21	0,99800	0,99797	0,99795	0,99793	0,99791	0,99789	0,99786	0,99784	0,99782	0,99780
22	0,99777	0,99775	0,99773	0,99770	0,99768	0,99766	0,99763	0,99761	0,99759	0,99756
23	0,99754	0,99752	0,99749	0,99747	0,99745	0,99742	0,99740	0,99737	0,99735	0,99732
24	0,99730	0,99727	0,99725	0,99722	0,99720	0,99717	0,99715	0,99712	0,99710	0,99707
25	0,99705	0,99702	0,99700	0,99697	0,99694	0,99692	0,99689	0,99687	0,99684	0,99681

12.3 Zur Umrechnung von Einheiten

Dieses Kapitel enthält die Umrechnung zwischen den Druckeinheiten Torr und Pascal und zwischen den Temperatureinheiten Grad Celsius und Kelvin. Im Zuge der Herleitung der Umrechnungsformeln wird auch auf die normgerechte Schreibweise der drei Arten an mathematisch-physikalischen Gleichungen eingegangen, nämlich der Größengleichungen, der zugeschnittenen Größengleichungen und der Zahlenwertgleichungen.

12.3.1 Druckeinheiten Torr und Pascal

Die nicht SI-konforme Druckeinheit Torr ist durch die zugeschnittene Größengleichung

$$\frac{p_{Torr}}{Torr} = \frac{h}{mm\ Hg} \qquad (12\text{-}3)$$

$[p_{Torr}] = Torr$ Druck
$[h] = mm$ Höhe der Quecksilbersäule

definiert. Die Division einer Größe durch ihre Einheit liefert den Zahlenwert einer Größe, sodass in Gleichung 12-3 – physikalisch korrekt – zwei Zahlenwerte bzw. zwei Konstante gleichgesetzt werden. Hingegen wäre die Größengleichung $p_{\mathrm{Torr}} = h\,\mathrm{Hg}$ wertlos, denn p_{Torr} besitzt die Dimension des Drucks ($\dim p_{\mathrm{Torr}} = \mathsf{M}\,\mathsf{L}^{-2}\,\mathsf{T}^{-2}$), während h eine Länge darstellt ($\dim h = \mathsf{L}$). Es ist daher gar nicht möglich, h in der Einheit Torr anzugeben, und nur dann würde die Größengleichung p_{Torr} in der gewünschten Einheit Torr ergeben.

Die physikalisch und daher auch den Dimensionen nach korrekte Größengleichung für den Druck p, den eine Quecksilbersäule mit der Höhe h bewirkt, lautet

$$p = \rho_{\mathrm{Hg}}(t) \cdot g \cdot h\,.$$

p	Druck
ρ_{Hg}	Dichte von Quecksilber (Hg) bei gegebener Temperatur t des Quecksilbers
g	örtliche Fallbeschleunigung
h	Höhe der Quecksilbersäule

(Auf die Angabe der Einheiten der genannten Größen wurde bewusst verzichtet, hingegen wäre die Angabe der Dimensionen wünschenswert. Es ist nämlich für die obige Gleichung egal, in welchen Einheiten man die Größen einsetzt, solange diese dieselbe Dimension wie die Größe besitzen).
Neben der Quecksilberbarometer-Ablesung h muss also noch die örtlich gültige Fallbeschleunigung g und die Dichte von Quecksilber ρ_{Hg} bekannt sein. Während Quecksilber als inkompressibel angesehen werden kann, besteht eine geringfügige Abhängigkeit der Dichte ρ_{Hg} von der Temperatur. Der Druck in Pa, dem eine bestimmte Höhe Quecksilbersäule h entspricht, ist daher eine Funktion der Temperatur. Das wird deutlich, wenn man Literaturangaben für die Dichte von Quecksilber sucht. Der Wert $\rho_{\mathrm{Hg}} = 13593\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$ – leider ohne Temperaturangabe – stammt von Vogel [1999]. Lide [2002] gibt eine Dichte von $\rho_{\mathrm{Hg}}(t = 25\,^{\circ}\mathrm{C}) = 13533{,}6\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$ und einen Längenausdehnungskoeffizienten $\alpha = 60{,}4\times10^{-6}\,\mathrm{K^{-1}}$ an (demnach müsste die Dichte bei 0 °C in grober Näherung $\rho_{\mathrm{Hg}}(t_2) = \rho_{\mathrm{Hg}}(t_1)/(1 + \alpha\cdot(t_2 - t_1)) \;\rightarrow\; \rho_{\mathrm{Hg}}(0\,^{\circ}\mathrm{C}) = \rho_{\mathrm{Hg}}(25\,^{\circ}\mathrm{C})/(1 + \alpha\cdot(0 - 25)) = 13554{,}1\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$ betragen); eine Angabe aus dem Web lautet $\rho_{\mathrm{Hg}}(t = 20\,^{\circ}\mathrm{C}) = 13579{,}034\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$, eine andere $\rho_{\mathrm{Hg}} = 13546\,\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$ (ohne Angabe der Temperatur). Die World Meteorological Organization gibt zwar keine Funktion $\rho_{\mathrm{Hg}}(t)$ an, sieht jedoch eine Temperaturkorrektur für den Ablesewert (siehe weiter unten) je nach Typ des Quecksilberbarometers vor, die insbesondere den kubischen Ausdehnungskoeffizienten von Quecksilber $\rho_{\mathrm{Hg}} = 181{,}8\times10^{-6}\,\mathrm{K^{-1}}$ berücksichtigt [WMO, 1983].
Wenn keine Gravimetermessung zur Bestimmung der örtlichen Fallbeschleunigung verfügbar ist, kann diese laut WMO [1983] in Abhängigkeit vom Breitengrad und von der Seehöhe durch folgende Formeln genähert werden:

$$g_{\varphi\,0} = 9{,}806\,16\cdot(1 - 0{,}002\,637\,3\cdot\cos 2\varphi + 0{,}000\,059\cdot\cos^2 2\varphi)$$

$[g_{\varphi\,0}]$	$= \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$	theoretische Fallbeschleunigung auf Meeresniveau in Abhängigkeit vom Breitengrad
$[\varphi]$	$= °$	Breitengrad

$$g = g_{\varphi\,0} - 0{,}000\,003\,086\cdot H + 0{,}000\,001\,118\cdot(H - H')$$

$[g]$	$= \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$	lokale Fallbeschleunigung an einem bestimmten kontinentalen Ort mit bekanntem Breitengrad und bekannter Seehöhe
$[H]$	$= \mathrm{m}$	Seehöhe (in m ü. A.) des Punktes, in dem gemessen wird
$[H']$	$= \mathrm{m}$	durchschnittliche Seehöhe des Geländes in einem Umkreis von 150 km

Für Messungen auf dem offenen Meer oder in Küstennähe sind ähnliche Korrekturen vorzunehmen.

Wenn nun die Dichte von Quecksilber bei der herrschenden Temperatur, die örtliche Fallbeschleunigung und natürlich die Ablesung h bekannt sind, kann der aktuelle Luftdruck bei gegebener Temperatur und gegebener Seehöhe in der Einheit Pa berechnet werden.

Die World Meteorological Organization (WMO) legte hingegen fest, dass die Angabe des Luftdrucks in p_{Torr} so zu erfolgen hat, dass das Produkt aus p_{Torr}, der Norm-Fallbeschleunigung g_{n} und der Quecksilberdichte im Normzustand $\rho_{\mathrm{Hg}\,0}$ genau den Druck ergibt, der sich aus der Ablesung h, der örtlichen Fallbeschleunigung g und der Dichte ρ_{Hg} bei der vorhandenen Quecksilbertemperatur auch ergeben würde, also so als ob die örtliche Fallbeschleunigung genau g_{n} entsprochen und die Quecksilbertemperatur genau 0 °C betragen hätte. Während der Ablesewert h eines Quecksilberbarometers dementsprechend zu korrigieren ist, liefert ein Aneroidbarometer mit Torr-Anzeige direkt den Wert p_{Torr}, der dann mit $\rho_{\mathrm{Hg}\,0}$ und g_{n} in die Einheit Pascal umzurechnen ist.

Nachdem für die SI-Druckeinheit Pascal

$$\mathrm{Pa} \equiv \mathrm{kg{\cdot}m^{-2}{\cdot}s^{-2}} \equiv (\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}){\cdot}(\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}){\cdot}(\mathrm{mm}\times 10^{-3}) \qquad (\mathrm{m} \equiv \mathrm{mm}\times 10^{-3})$$

gilt, lässt sich der Druck in der Einheit Pa durch die zugeschnittene Größengleichung

$$\frac{p}{\mathrm{Pa}} = \frac{\rho_{\mathrm{Hg}}(t)}{\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}} \cdot \frac{g}{\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}} \cdot \frac{h}{\mathrm{mm\ Hg}} \times 10^{-3} \qquad \left(\frac{h}{\mathrm{m}} = \frac{h}{\mathrm{mm}} \times 10^{-3}\right)$$

$[p]$	= Pa	Druck
$[\rho_{\mathrm{Hg}}]$	= $\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$	Dichte von Quecksilber bei gegebener Temperatur t des Quecksilbers
$[g]$	= $\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$	örtliche Fallbeschleunigung
$[h]$	= mm	Höhe der Quecksilbersäule

angeben, aus der man letztlich nach Substitution von h /mm Hg durch p_{Torr} /Torr gemäß Gleichung 12-3 die Beziehung zwischen den Druckeinheiten Torr und Pa erhält:

$$\frac{p}{\mathrm{Pa}} = \frac{\rho_{\mathrm{Hg}\,0}}{\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}} \cdot \frac{g_{\mathrm{n}}}{\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}} \cdot \frac{p_{\mathrm{Torr}}}{\mathrm{Torr}} \times 10^{-3}\,.$$

$[p]$	= Pa	Druck (in der Einheit Pascal)
$[\rho_{\mathrm{Hg}\,0}]$	= $\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$	Dichte von Quecksilber im Normzustand. $\rho_{\mathrm{Hg}\,0} = 13595{,}1\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}$ bei $t_0 = 0$ °C (und $p_0 = 101325$ Pa) laut WMO
$[g]$	= $\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$	Normwert für die Fallbeschleunigung. $g_{\mathrm{n}} = 9{,}80665\ \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}$
$[p_{\mathrm{Torr}}]$	= Torr	Druck (in der Einheit Torr)

Das Einsetzen der gegebenen Standardwerte liefert die zugeschnittene Größengleichung

$$\frac{p}{\mathrm{Pa}} = \frac{13595{,}1\ \mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}}{\mathrm{kg{\cdot}m^{-3}}} \cdot \frac{9{,}80665\ \mathrm{m{\cdot}s^{-2}}}{\mathrm{m{\cdot}s^{-2}}} \cdot \frac{p_{\mathrm{Torr}}}{\mathrm{Torr}} \times 10^{-3}$$

bzw.

$$\boxed{\frac{p}{\mathrm{Pa}} = \frac{p_{\mathrm{Torr}}}{\mathrm{Torr}} \times 133{,}322}\,.$$

Der klassische atmosphärische Normdruck von $p_{\mathrm{Torr}\,0} = 760$ Torr entspricht demnach einem Druck in der Einheit Pa von

$$\frac{p_0}{\mathrm{Pa}} = \frac{p_{\mathrm{Torr}\,0}}{\mathrm{Torr}} \times 133{,}322 = \frac{760\ \mathrm{Torr}}{\mathrm{Torr}} \times 133{,}322 = 101325$$

bzw.

$$p_0 = 101325\ \mathrm{Pa}\,.$$

Um Luftdruckmessungen aus verschiedenen Orten, die im Allgemeinen auch in verschiedenen Höhen gemessen werden, miteinander vergleichbar zu machen, müssen sie auf ein bestimmtes Standardniveau – üblicherweise Meereshöhe – reduziert werden. In erster Näherung ist hierfür wohl die barometrische Höhenformel [Vogel, 1999]

$$p(z) = p_{\text{Meereshöhe}} \cdot \exp(-z/H)$$

$[p(z)]$ = Pa Luftdruck in einer bestimmten Höhe z über Meeresniveau
$[p_{\text{Meereshöhe}}]$ = Pa Luftdruck auf Meereshöhe
$[z]$ = m Höhe über dem Nullniveau (Meereshöhe)
$[H]$ = m Skalenhöhe; Konstante, die von der Temperatur abhängig ist. Für $t_0 = 0$ °C gilt $H = 8005$ m [Vogel, 1999]

geeignet, doch empfiehlt die WMO modifizierte Formeln.

12.3.2 Temperatureinheiten Kelvin und Grad Celsius

Der Zusammenhang zwischen den Temperatureinheiten Grad Celsius und Kelvin wird in der ON V 118 [1996] durch die Gleichung

$$t = T - 273{,}15\ \text{K}$$

$[t]$ = °C Temperatur in Grad Celsius
$[T]$ = K Temperatur in Kelvin

angegeben. Diese Gleichung ist nicht korrekt formuliert. Sie ist weder eine Zahlenwertgleichung – denn eine solche darf keine Einheiten enthalten – noch eine Größengleichung, denn die Summe aus den beiden Größen in Kelvin auf der rechten Seite ergeben nichts anderes wie Kelvin, und das Einsetzen der Größe T in einer anderen Einheit (das müsste natürlich °C sein) als Kelvin wäre wegen der Addition unterschiedlicher Einheiten gänzlich falsch. Die korrekte Interpretation als Größengleichung besagt nur, dass die Summe zweier Kelvin-Temperaturen auch durch eine Celsius-Temperatur angegeben werden kann, aber nicht durch welche! Als Größengleichung ist sie daher zur Umrechnung zwischen den Einheiten ungeeignet. Das Dilemma wird noch klarer, wenn man die Gleichung invertiert: $T = t + 273{,}15\ \text{K}$

Jetzt stehen die Einheiten der beiden Größen auf der rechten Seite (°C und K) sogar im Widerspruch, während die Interpretation als Zahlenwertgleichung unter Weglassung der Einheit K den physikalisch richtigen Zusammenhang beschreibt. Interpretiert man beide Gleichungen hingegen schlampig als zur Umrechnung geeignete Größengleichungen, so brächte die Umrechnung der konstanten Größe 273,15 K mit der ersten Gleichung einen Wert in °C von

$$t = 273{,}15\ \text{K} - 273{,}15\ \text{K} = 0\ \text{°C},$$

und für die Invertierung erhielte man $T = t + 0\ \text{°C}$,

also $T = t$!! Damit wurde hoffentlich klar aufgezeigt, wohin die durch eine großzügige Interpretation versuchte Rettung einer missglückten Gleichung führen kann. Daraus muss der Schluss gezogen werden, dass auf eine korrekte Schreibung der physikalischen Zusammenhänge größter Wert zu legen ist (und das speziell in einer Norm!).

Die Beziehung zwischen denselben Größen in unterschiedlichen Einheiten wird elegant – und vor allem korrekt – durch eine zugeschnittene Größengleichung dargestellt. Sie lautet für die Einheiten Grad Celsius und Kelvin:

$$\boxed{\frac{t}{°C} = \frac{T}{K} - 273{,}15}$$

[t] = °C Temperatur in Grad Celsius
[T] = K Temperatur in Kelvin

(beachte, dass die Spezifikation der Einheiten durch eine separate Legende nicht notwendig wäre, weil sie definitionsgemäß bereits durch die Bruchschreibweise gegeben ist). Diese Gleichung ist auch in invertierter Form korrekt:

$$\frac{T}{K} = \frac{t}{°C} + 273{,}15$$

bzw.

$$T = \left(\frac{t}{°C} + 273{,}15\right) K \,. \qquad (12\text{-}4)$$

12.4 Erläuterungen zur Korngrößenanalyse

Die Korngrößenanalyse nach dem im Kapitel 3 vorgestellten Verfahren unterscheidet sich in einigen wesentlichen Punkten von dem in der ÖNORM L 1061-2 [2002] geschilderten. Insbesondere erfolgt sowohl die Bodeneinwaage als auch die Wägung des Eindampfrückstandes im lufttrockenen Zustand (er wird deshalb so lange an der Luft stehen gelassen, bis er wieder Wasserdampf aus der Luft aufgenommen hat), sodass sich der Wassergehalt des lufttrockenen Bodens in der Auswertung herauskürzt.

12.4.1 Zerkleinerung von Aggregaten

Da einzelne Körner mitunter eine geringere Festigkeit als Aggregate haben können, ist es nicht möglich, zwischen Primärteilchen und Aggregaten mit letzter Genauigkeit zu unterscheiden [Hartge und Horn, 1989]. Das führt dazu, dass besonders die Menge an Ton, die gefunden wird, stark von der Art der Aggregatzerstörung bzw. der Dispergierung abhängig ist. Aber auch am anderen Ende des Körnungsspektrums können Schwierigkeiten auftreten, z. B. wenn in der Kiesfraktion angewitterte Körner zerfallen.
Hartge und Horn erwähnen weiters, dass bei der sogenannten „Kulturtechnischen Körnungsanalyse“ nur mit destilliertem Wasser dispergiert wird, weil der dabei erhaltene Tongehalt im Hinblick auf die Beurteilung von Dränmaßnahmen aussagesicherer ist als der höhere Tongehalt nach stärkerer Dispergierung. Umgekehrt ist der so erhaltene Tongehalt wenig aussagefähig im Hinblick auf Konsistenz oder Zusammenhänge mit dem Kationenaustausch des Gesamtbodens.
Ein besonderes Problem bieten Böden mit hohem Gehalt an wasserlöslichen Salzen. Je nach der Fragestellung ist zu entscheiden, ob das Salz vor der Analyse ausgewaschen werden muss oder nicht. Hohe Salzgehalte halten die Tonfraktionen geflockt, lassen den Boden also grobkörniger erscheinen.

Die Zerlegung der Aggregate kann grundsätzlich rein mechanisch, z. B. manuell mit Reibschale und Mörser oder maschinell mit der Kugelmühle, oder überwiegend chemisch durch Einweichen mit der Dispergiermittellösung geschehen. Bei Untersuchungen am Institut wurde festgestellt, dass die Dauer und die Intensität des Reibens mit Mörser und Reibschale einen großen Einfluss auf das Ergebnis vor allem für den Tongehalt aufweist. Die Grenze der Zerstörung von Aggregaten und der Zerstörung von Primärteilchen ist oft fließend, sodass weder eine händische noch eine maschinelle Zerkleinerung eindeutige Ergebnisse zulässt. Daher wurde beschlossen, ähnlich wie beim ÖNORM-Verfahren die Aggregate nur durch Einweichen mit der Dispergiermittellösung und anschließendem längeren Schütteln in der Rotierapparatur zu zerlegen. Bei Böden mit einem geschätzten Grobkornanteil < 10 %, bei denen die Grobkornsiebung unterbleibt, erfolgt die Vorbehandlung mit Reibschale und Mörser nur, um eine möglichst homogene Gesamtprobe für alle Untersuchungen zu erhalten (und nicht eine durch wenige Aggregate verfälschte).

12.4.2 Dispergiermittelmasse in der Pipette

Die ÖNORM L 1061–2 [2002] sieht als Dispergiermittel eine Lösung von Tetranatriumdiphosphat-Dekahydrat in der Konzentration $c\,(Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O) = 0{,}1$ mol/L vor, wofür die Masse von

44,608 g $Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O$ in Wasser zu lösen und auf 1,000 L aufzufüllen ist (das pulvrige $Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O$ besitzt etwa eine Dichte von 1,0 g/cm^3, sodass das trockene Dispergiermittel etwa 44 mL einnimmt. Die Überlegung, dass dann etwa 1000 − 44 = 956 mL Wasser nötig wären, um 1,000 L Lösung zu ergeben, ist falsch, weil das Pyrophosphat in der Lösung viel weniger Volumen einnimmt. Es sind daher sicher mehr als 956 mL notwendig, aber sicher auch weniger als 1000 mL Wasser). Laut Angabe auf dem Behälter des 2,5-kg-Gebindes der Fa. MERCK beträgt die molare Masse $M(Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O)$ = 446,06 g/mol, sodass zur Herstellung einer Lösungskonzentraion von 0,1 mol/L die Masse von 44,606 g nötig wäre. Laut den auf drei Nachkommastellen gerundeten IUPAC-Empfehlungen von 1986 (Periodensystem der Elemente, zitiert von Jakubke und Karcher [1998]) hat Na eine relative Atommasse A_r = 22,990, P eine solche von A_r = 30,974, O von 15,998 und H von A_r = 1,008. Ein Molekülverband $Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O$ besitzt daher die relative Masse von

$$4\times22{,}990 + 2\times30{,}974 + 7\times15{,}998 + 10\times(2\times1{,}008 + 15{,}998) = 446{,}034$$

bzw.

$$265{,}894 + 180{,}140 = 446{,}034.$$

Der Anteil des Natriumpyrophosphats am Molekülverband weist also eine relative Masse von 265,894 auf, während der Wasseranteil 180,140 beträgt. Bei den im Periodensystem eingetragenen relativen Atommassen sind die Isotope entsprechend ihrer natürlichen Häufigkeit gewichtet, die im Produkt der Fa. MERCK nicht notwendigerweise dieselbe sein muss. Außerdem liegt dessen Reinheit weit unter der Abweichung (446,06 − 446,034).

Alles in allem sind die Unterschiede zwischen der ÖNORM-Angabe, der Verpackungsangabe und der Molekülmasse so gering, dass sie vernachlässigt werden können und im Weiteren von einer Lösung mit 44,608 g $Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O$ gemäß der ÖNORM-Angabe ausgegangen wird.

Im später aus dem Absetzzylinder entnommenen Pipettevolumen sind Wasser, Boden und Natriumpyrophosphat enthalten, wovon das gesamte Wasser durch Eindampfen verloren geht. Weiters wird angenommen, dass das in der Eindampfschale wieder zum Feststoff erstarrte Natriumpyrophosphat während des Auskühlens im Gegensatz zum Boden keinen Wasserdampf aus der Luft aufnimmt. Für die Berücksichtigung der Masse des Dispergiermittels in der Eindampfschale ist daher nur der Massenanteil des Natriumpyrophosphats heranzuziehen.

Für die Berechnung des Anteils des Natriumpyrophosphats am Molekülverband werden die Atommassen der IUPAC-Empfehlungen von 1986 (Periodensystem der Elemente, zitiert von Jakubke und Karcher [1998]) verwendet, was den Quotienten

$$265{,}894/446{,}034 = 0{,}5961294$$

ergibt. Es wird nun angenommen, dass das Verhältnis zwischen dem Natriumpyrophosphat-Anteil und dem Wasser-Anteil im Produkt der Fa. MERCK diesem Verhältnis entspricht. In einem Liter der Dispergierlösung, die 44,608 g $Na_4P_2O_7 \cdot 10\,H_2O$ enthält, ist demnach

$$44{,}608\text{ g} \times 0{,}5961294 = 26{,}592142\text{ g}$$

Natriumpyrophosphat enthalten. Werden dem Boden im Absetzzylinder 50 mL von dieser Lösung zugesetzt, entspricht das einer Masse von

$$26{,}592142\text{ g} / 1{,}000\times10^3\text{ mL} \times 50{,}0\text{ mL} = 1{,}3296071\text{ g}.$$

Werden für eine Blindprobe ohne Boden in einem Absetzzylinder 50,0 mL der Dispergierflüssigkeit mit Wasser auf 1,000 L Volumen aufgefüllt, so enthält ein Milliliter der Lösung genau

$$1{,}3296071\text{ g} / 1{,}000\times10^3\text{ mL} = 1{,}3296071\times10^{-3}\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}.$$

Entnimmt man davon mit einer Pipette 20,0 mL, sollte der Eindampfrückstand

$$1{,}3296071\times10^{-3}\ \mathrm{g\cdot mL^{-1}} \times 20{,}0\ \mathrm{mL} = 0{,}0265921\ \mathrm{g}$$

betragen. Wird die Einwaage für die Herstellung der Suspension auf Hundertstel Gramm gewogen (44,61 g), sollte die Analysenwaage mit einer Genauigkeit von ±0,1 mg eine Masse des Eindampfrückstandes (ohne Berücksichtigung der Fehler bei den Volumina) von

$$44{,}61\ \mathrm{g} \times 0{,}5961294 / (1{,}000\times10^{3}\ \mathrm{mL}) \times 50{,}0\ \mathrm{mL} / (1{,}000\times10^{3}\ \mathrm{mL}) \times 20{,}0\ \mathrm{mL} = 0{,}0266\ \mathrm{g}$$

anzeigen. Genau dieser Wert wird standardgemäß vom Eindampfrückstand abgezogen, um die Bodenmasse in der Pipette zu erhalten.

Die DIN 66115 [1983] sieht vor, den Blindwert durch einen Versuch zu ermitteln (in der neuen ÖNORM L1061-1 [2002] ist die experimentelle Ermittlung des Blindwertes nicht vorgeschrieben). Dafür sind jeweils 50,0 mL Lösung in drei Zylindern mit entionisiertem Wasser auf 1,000 L aufzufüllen, 20,0 mL davon zu pipettieren und einzudampfen. Der Mittelwert der drei Eindampfreste ist die pro Pipette in Abzug zu bringende Masse an Tetranatriumdiphosphat.

Genau genommen hängt die Dispergiermittelmasse in den einzelnen Pipetten davon ab, ob und wie stark das Dispergiermittel von den einzelnen Fraktion Sand, Schluff und Ton adsorbiert wird. Am wahrscheinlichsten ist wohl, dass es zum überwiegenden Teil in Lösung bleibt und zum kleineren Teil von den Tonpartikeln adsorbiert wird, doch führen auch andere Annahmen nur zu marginalen Abweichungen vom theoretischen Wert von 0,0266 g in jeder Pipette.

LITERATURVERZEICHNIS

Boersma L. 1965. Field Measurement of Hydraulic Conductivity Above a Water Table (in: Black C A (ed). 1965. Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods, Including Statistics of Measurement and Sampling (Agronomy No 9). Wisconsin: Soil Science Society of America)

Bouwer H. 1978. Groundwater Hydrology. London: McGraw-Hill Book Company

Cerbe G, Hoffmann H-J. 1994. Einführung in die Thermodynamik. 10te Aufl. München: Carl Hanser Verlag

de Laeter J R, Böhlke J K, de Bièvre P, Hidaka H, Peiser H S, Rosman K J R, Taylor P D P. 2003. Atomic Weights of the Elements: Review 2000 (IUPAC Technical Report) (Pure Appl. Chem., Vol. 75, No. 6, pp. 683–800)

DIN 66111. 1989. Partikelgrößenanalyse; Sedimentationsanalyse; Grundlagen. Berlin: Deutsches Institut für Normung

DIN 66115. 1983. Partikelgrößenanalyse; Sedimentationsanalyse im Schwerefeld; Pipette-Verfahren. Berlin: Deutsches Institut für Normung

Elrick D E. 2002, Reynolds W D. 1992. Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrometers. (In: Topp G C (Hrsg). 1992. Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice (SSSA Special Publication No 30). Wisconsin: Soil Science Society of America)

Hartge K H, Horn R. 1989. Die physikalische Untersuchung von Böden. 2te Auflage. Stuttgart: Enke Verlag

ISO/TR 3666. 1998. Viscosity of Water. Reference Number ISO/TR 3666:1998/(E). 2nd edition. Genève, Switzerland: International Organization for Standardization

Jakubke H D, Karcher R (Hrsg). 1998. Lexikon der Chemie; Erster Band A bis Gese. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag

Kemper W D, Koch J E. 1966. Technical Bulletin No 1355. United States Department of Agriculture: Agricultural Research Service

Klute A (ed). 1986. Methods of Soil Analysis Part 1: Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed (Agronomy No 9). Wisconsin: Soil Science Society of America

Mortimer Ch E, Müller U. 2003. Chemie: Das Basiswissen der Chemie. 8te Aufl. Stuttgart: Thieme

ON V 118. 1996. Größen und Einheiten in Physik und Technik. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM A 2730. 1984. Physikalische Größen: Wortverbindungen mit den Wörtern Konstante, Koeffizient, Zahl, Faktor, Grad, Maß und Pegel. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM A 2731. 1984. Physikalische Größen: Gebrauch der Wörter bezogen, spezifisch, relativ, normiert und reduziert. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM A 6409. 1975. Physikalische Größen: Größen, Einheiten, Zahlenwerte, Dimensionen. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM L 1050. 1994. Boden als Pflanzenstandort – Begriffsbestimmungen, Untersuchungsverfahren. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM L 1061-1. 2002. Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens; Teil 1: Grobboden. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM L 1061-2. 2002. Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Korngrößenverteilung des Mineralbodens; Teil 2: Feinboden. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM L 1062. 1988. Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Wassergehaltes und des Wasseranteiles. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM L 1066. 1988. Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Versickerungsintensität mittels Doppelzylinder-Infiltrometer

ÖNORM L 1081. 1989. Humusbestimmung durch Naßoxidation mit Kaliumdichromat-Schwefelsäure. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM L 1082. 1989. Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung von Gesamtstickstoff. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

ÖNORM L 1091. 1999. Chemische Bodenuntersuchungen – Bestimmung von mineralischem Stickstoff – N_{min}-Methode. Wien: Österreichisches Normungsinstitut

Reynolds W D, Elrick D E. In Situ Measurement of Field-Saturated Hydraulic Conductivity, Sorptivity, and the α-Parameter Using the Guelph-Permeameter. Soil Science Vol 140, No 4: 292-302

Reynolds W D, Elrick D E. 2002. Constant Head Well Permeameter (Vadose Zone) (in: Dane J H, Topp G C (Hrsg). 2002. Methods of Soil Analysis Part 4 – Physical Methods. (SSSA Book Series: 5). Wisconsin: Soil Science Society of America)

Reynolds W D, Elrick D E, Youngs E G. 2002a. Ring or Cylinder Infiltrometers (Vadose Zone) (in: Dane J H, Topp G C (Hrsg). 2002. Methods of Soil Analysis Part 4 – Physical Methods. (SSSA Book Series: 5). Wisconsin: Soil Science Society of America)

Reynolds W D, Elrick D E, Youngs E G. 2002b. Single-Ring and Double- or Concentric-Ring Infiltrometers (in: Dane J H, Topp G C (Hrsg). 2002. Methods of Soil Analysis Part 4 – Physical Methods. (SSSA Book Series: 5). Wisconsin: Soil Science Society of America)

SoilMoisture Equipment Corp. 1986. 2800K1 Guelph Permeameter: Operating Instructions. Rev 8/86. Santa Barbara, CA: SoilMoisture Equipment Corp

SoilMoisture Equipment Corp. 2008. 2800K1 Operating Instructions. Santa Barbara, CA: SoilMoisture Equipment Corp

Tanaka M, Girard G, Davis R, Peuto A, Bignell N. 2001. Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports. Metrologia 38, 301–309

Taylor B N. 1995. Guide for the Use of the International System of Units (NIST Special Publication 811). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, U S Department of Commerce

Truckenbrodt E. 1980. Fluidmechanik Band 1. 2te Aufl. Berlin: Springer Verlag

Vogel H. 1999. Gerthsen Physik. 20te Aufl. Berlin: Springer Verlag

World Meteorological Organization (WMO). 1983. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO No 8. 5th ed. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization

Zhang Z F, Groenevelt P H, Parkin G W. 1998. The well shape-factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter. Soil Tillage Res 49: 219-221

Feststoffdichte ρ_s – Pyknometerversuch

V_P ..... Pyknometervolumen
m_P..... Masse des Pyknometers inklusive zugehörigem Stoppel
m_{P+s+w} ..... Masse des Pyknometers mit lufttrockener Bodeneinwaage; inkl. Stoppel
w..... Massenwassergehalt des Bodens; separat bestimmt
$m_{P+s+w+W}$..... Masse des mit entlüftetem Wasser aufgefüllten Pyknometers, die Bodeneinwaage beinhaltend; inklusive Stoppel
t ..... Temperatur im gefüllten Pyknometer

Probennummer Labor:						analysiert am:	
Entnahmedaten:						Bearbeiter:	
i	Pykno-meter Nr.	V_P/cm^3 ± 0,001	m_P/g ± 0,001	m_{P+s+w}/g ± 0,001	w/(g·g^{-1}) ± 0,0001	$m_{P+s+w+W}$/g ± 0,001	t / °C ± 0,1
1							
2							
3							
4							

Probennummer Labor:						analysiert am:	
Entnahmedaten:						Bearbeiter:	
5							
6							
7							
8							

m_s ..... Feststoffmasse der lufttrockenen Bodeneinwaage
V_w ..... Volumen des Bodenwassers in der lufttrockenen Bodeneinwaage
V_W..... Volumen der aufgefüllten Wassermasse im Pyknometer
V_s..... Feststoffvolumen der lufttrockenen Bodeneinwaage

i	Pykno-meter Nr.	Wasser-dichte ρ_w/(g·cm^{-3})	$m_s = \frac{m_{P+s+w} - m_P}{1+w}$ / m_s/g	$V_w = \frac{m_s \cdot w}{\rho_w}$ / V_w/cm^3	$V_W = \frac{m_{P+s+w+W} - m_{P+s+w}}{\rho_w}$ / V_W/cm^3	$V_s = V_P - V_w - V_W$ / V_s/cm^3	$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$ / ρ_s/(g·cm^{-3})
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

Dichte von Wasser [Tanaka et al., 2001]:

$$\rho_w(t) = a_5 \cdot \left[1 - \frac{(t + a_1)^2 \cdot (t + a_2)}{a_3 \cdot (t + a_4)}\right] \qquad 0\,°C \le t \le 40\,°C$$

a_1 / °C	=	−3,983035
a_2 / °C	=	301,797
a_3 / °C^2	=	522528,9
a_4 / °C	=	69,34881
a_5 / (g·cm^{-3})	=	0,999974950

Tabelle: Dichte von Wasser $\rho_w(t)$ in g·cm^{-3}, t in °C

t/°C	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
16	0,99895	0,99893	0,99891	0,99890	0,99888	0,99886	0,99885	0,99883	0,99881	0,99880
17	0,99878	0,99876	0,99874	0,99873	0,99871	0,99869	0,99867	0,99865	0,99864	0,99862
18	0,99860	0,99858	0,99856	0,99854	0,99852	0,99850	0,99849	0,99847	0,99845	0,99843
19	0,99841	0,99839	0,99837	0,99835	0,99833	0,99831	0,99829	0,99827	0,99825	0,99823
20	0,99821	0,99819	0,99817	0,99814	0,99812	0,99810	0,99808	0,99806	0,99804	0,99802
21	0,99800	0,99797	0,99795	0,99793	0,99791	0,99789	0,99786	0,99784	0,99782	0,99780
22	0,99777	0,99775	0,99773	0,99770	0,99768	0,99766	0,99763	0,99761	0,99759	0,99756
23	0,99754	0,99752	0,99749	0,99747	0,99745	0,99742	0,99740	0,99737	0,99735	0,99732
24	0,99730	0,99727	0,99725	0,99722	0,99720	0,99717	0,99715	0,99712	0,99710	0,99707
25	0,99705	0,99702	0,99700	0,99697	0,99694	0,99692	0,99689	0,99687	0,99684	0,99681

Tabelle: Massen und Volumina der 50-mL-Pyknometer des IHLW-Labors

Nr.	Masse m_P/g	Volumen V_P/cm^3	Nr.	Masse m_P/g	Volumen V_P/cm^3
1		50,827	61	28,6451	49,8981
9		50,947	62	29,7646	49,7858
26	31,1295	49,9436	63	29,4187	49,9274
27	32,6433	49,9365	64	28,8489	49,9375
28	31,8183	49,9597	69		51,095
31		49,773	77		50,999
32	31,7259	49,9358	86		51,174
34	30,3938	49,9649	110		50,333
39		50,394	111		51,331
46		51,345	113		51,600
47	32,8834	49,9858	117		51,086
51		51,432	133		51,130
52	30,6433	49,9427	136		51,782
53		50,369	138		51,339
54	29,1874	49,9528	180		50,995
56		51,594	203	31,7902	49,8980
59	31,0358	49,9245	311		51,293

KORNGRÖSSENANALYSE – geschätzter Grobbodenanteil < 10 %

Probennummer Labor:		analysiert am:	
Entnahmedaten:		Bearbeiter:	

FEINSIEBUNG

Masse lufttrockene Bodeneinwaage m_{ges} / g ± 0,01 =						Massenanteil p / %
i	SR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g ± 0,01	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g	Masse Siebrückstand (g) $m_{SR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$	**p [Grobb.] / % =** $100 \times m_{SR\,2,0}/m_{ges}$
1	2,0					
Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{ges} - m_{SR\,2,0\,mm}$ =						
2	1,0					**p [Feinb.] / % =** $100 \times m_{s+w} / m_{ges}$
3	0,63					
4	0,20					Sandanteil $p\,[S]_S$ / % = $100 \times (\Sigma m_{SR\,i}) / m_{s+w}$ =
5	0,125					
6	0,063					
Masse Sand (g) = $\Sigma m_{SR\,i}$ ohne $m_{SR\,2,0\,mm}$ (i = 2…6) =						

PIPETTIERVERFAHREN nach KUBIENA

Suspensionstemp. zu Beginn t_A/°C =					*: = $5000 \times m_{PR\,0,063\,mm} / m_{s+w}$	
Masse Feinbodeneinwaage m_{s+w}/g =					Masse Eindampfrückstand $m_{PR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$	Massenanteil p / %
i	PR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g ± 0,0001	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g	− 0,0266	100,0
1	0,063					– *
2	0,020					=
3	0,0063					= $p\,[S]_P$ / %
4	0,0020					$p\,[S]_S - p\,[S]_P$ =
Suspensionstemperatur nach der Pipettierung t_E/°C =						

KORNGRÖSSENANALYSE – geschätzter Grobbodenanteil ≥ 10 %

Probennummer Labor:		analysiert am:	
Entnahmedaten:		Bearbeiter:	

GROBSIEBUNG

Masse Bodeneinwaage (lufttrocken) m_{ges} / g =

i	SR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g ± 0,01	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g	Masse Siebrückstand (g) $m_{SR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$	Massenanteil p / %
1	70					
2	50					
3	22					**p [Feinb.] / %** = 100 − p[Grobb.]
4	16					
5	11,2					
6	8,0					
7	4,0					**p [Grobb.]/%** = 100×Σm_{GR}/m_{ges}
8	2,0					
Summe Grobsiebrückstände (g) (i = 1…8) Σ$m_{GR\,i}$ =						
D.gang 2,0						

FEINSIEBUNG

Masse Feinbodeneinwaage (lufttr.) m_{s+w}´ / g =

korr. Masse Feinboden (g) $m_{s+w} = m_{s+w}$´ − $m_{SR\,2,0\,mm}$ =

rel. Massenfehler / % = $\frac{m_{ges} - \Sigma m_{GR} - m_{D2,0}}{m_{ges}} \times 100$

i	SR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g ± 0,01	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g	Masse Siebrückstand (g) $m_{SR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$	Massenanteil p / %
1	2,0					
2	1,0					
3	0,63					Sandanteil $p\,[S]_S$ / % = $100 \times \frac{\Sigma m_{SR}}{m_{s+w}}$
4	0,20					
5	0,125					
6	0,063					
Masse Sand (g) = Σ$m_{SR\,i}$ ohne $m_{SR\,2,0\,mm}$ (i = 2…6) =						

PIPETTIERVERFAHREN

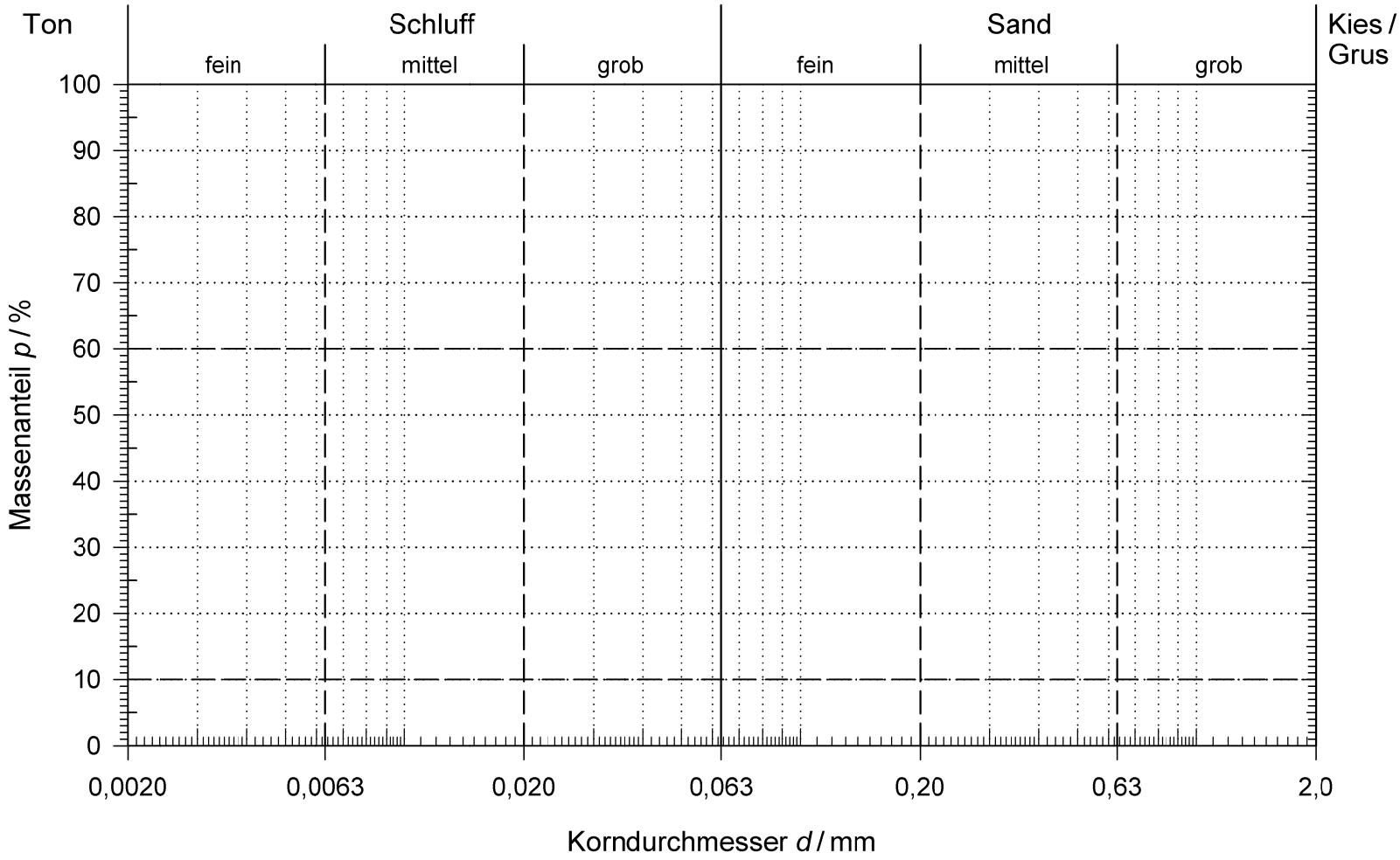
Suspensionstemp. zu Beginn t_A/°C =

*: = 5000×$m_{PR\,0,063\,mm}$ / m_{s+w}

Feinbodeneinwaage m_{s+w} / g =

i	PR $d_{gr\,i}$ / mm	Schale Nr.	Masse Schale $m_{Sch\,i}$ / g ± 0,0001	Masse Schale + Boden lufttr. $m_{Sch+s+w\,i}$ / g	Eindampfrückstand $m_{PR\,i}$ = $m_{Sch+s+w\,i} - m_{Sch\,i}$ − 0,0266	Massenanteil p / %
						100,0
1	0,063					− *
2	0,020					=
3	0,0063					= $p\,[S]_P$
4	0,0020					$p[S]_S - p[S]_P$ =
Suspensionstemperatur nach der Pipettierung t_E/°C =						

KORNGRÖSSENVERTEILUNG Probe:



d_{60} = mm, d_{10} = mm $U = d_{60}/d_{10}$ = $C = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10})$ = OVZ = d_w = mm

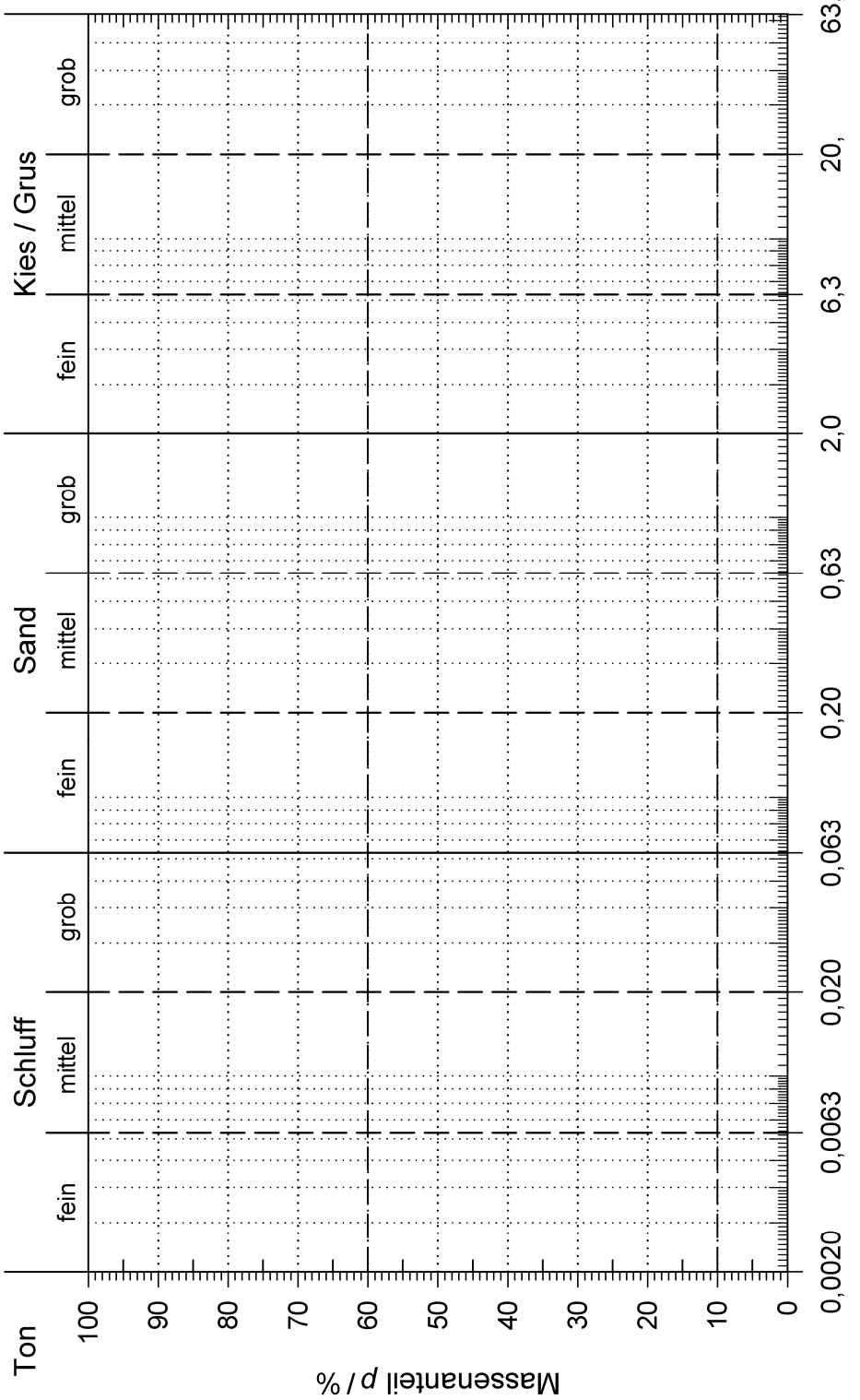
Korngrößenklassenbezeichnung nach ÖNORM L1050

Version 2011-11-29

INSTITUT FÜR HYDRAULIK UND LANDESKULTURELLE WASSERWIRTSCHAFT / WAU / BOKU WIEN

KORNGRÖSSENVERTEILUNG

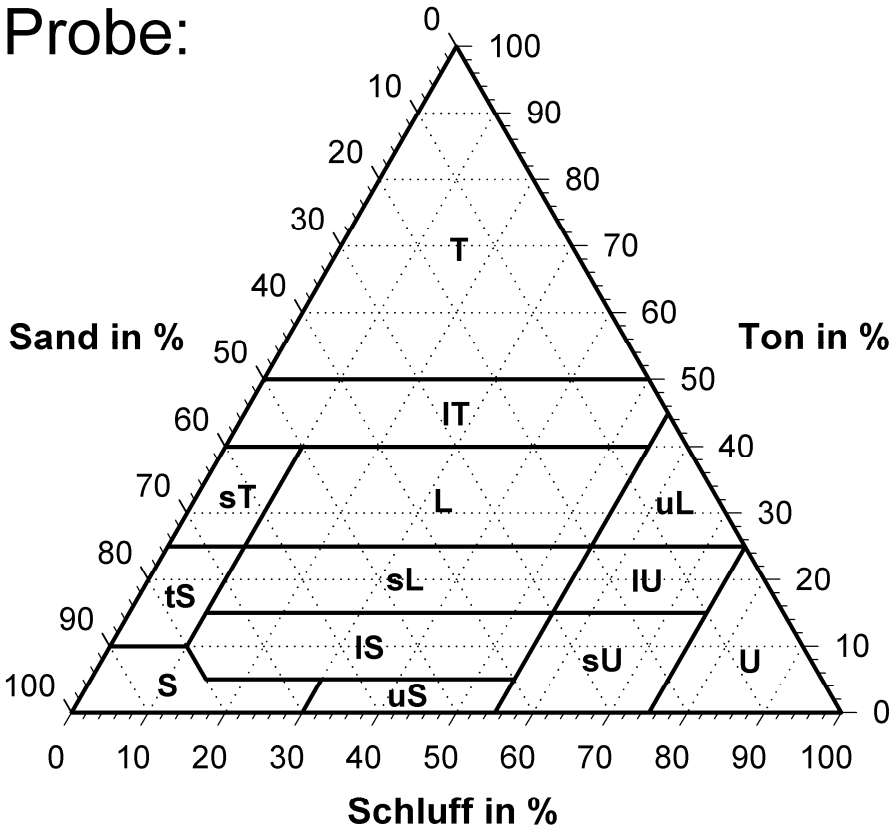
Probe:



d_{60} = mm, d_{10} = mm $U = d_{60}/d_{10}$ = $C = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10})$ = OVZ = d_w = mm

Korngrößenklassenbezeichnung nach ÖNORM L1050

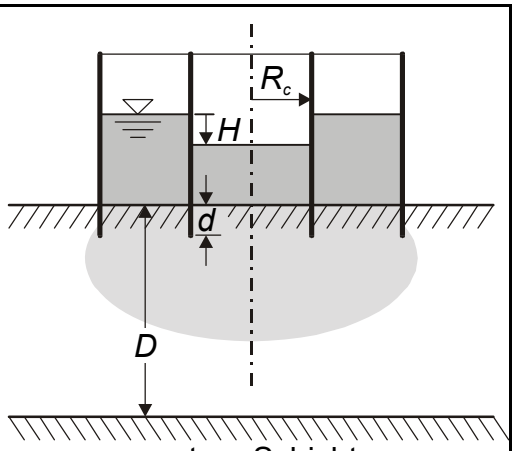
Probe:



Österreichisches Texturdreieck nach ÖNORM L 1050

Protokoll des instationären Doppelring-Infiltrometer-Versuchs

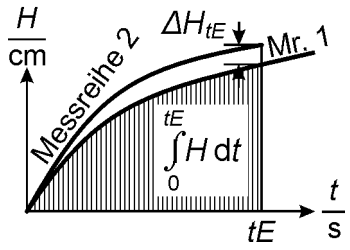
Datum:	
Bezeichnung:	
Beobachter:	
Eindringtiefe des Innenzylinders d / cm =	
Abstand von der unteren Schicht D / cm =	
Innenradius des Innenzylinders R_c / cm =	
Verhältnis D/R_c =	
Verhältnis d/R_c =	
Geometriebeiwert F = (aus Diagramm A oder B zu entnehmen)	



untere Schicht

undurchlässig	gut durchlässig
→ Nomogramm A	→ Nomogramm B

Messreihe 1: Wasserspiegel im Außenrohr konstant		Messreihe 2: Wasserspiegel im Außenrohr nachgeführt	
vorgewählte Absenkung im Innenrohr	Zeit, um Absenkung zu erreichen	vorgewählte Absenkung im Innenrohr	Zeit, um Absenkung zu erreichen
H / cm	t / s	H / cm	t / s
0,0	0	0,0	0



Höhenunterschied ΔH_{tE} zwischen der Absenkung der Messreihe 2 und der Messreihe 1 nach einer Enddauer t_E der Messreihe 2:

ΔH_{tE} = cm

Integral über $H(t)$ der Messreihe 1 von 0 bis t_E (der Messreihe 2):

$\int_0^{t_E} H\,dt$ = cm·s

$$k_{fs} = \frac{R_c}{F} \cdot \frac{\Delta H_{tE}}{\int_0^{t_E} H\,dt}$$

k_{fs} = cm/s

Anmerkungen:

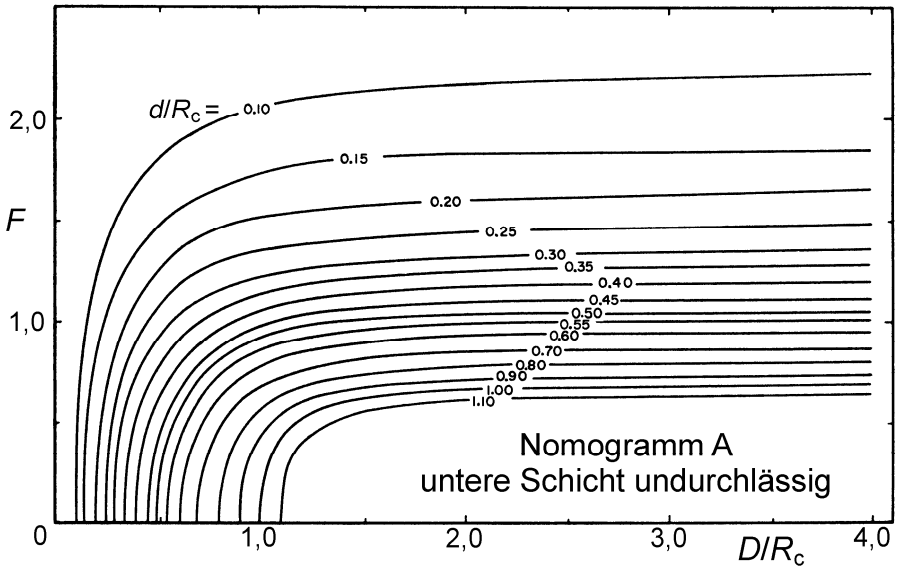


Abbildung: Nomogramm A für die Bestimmung des *F*-Faktors (untere Schicht undurchlässig) (BOERSMA, 1965)

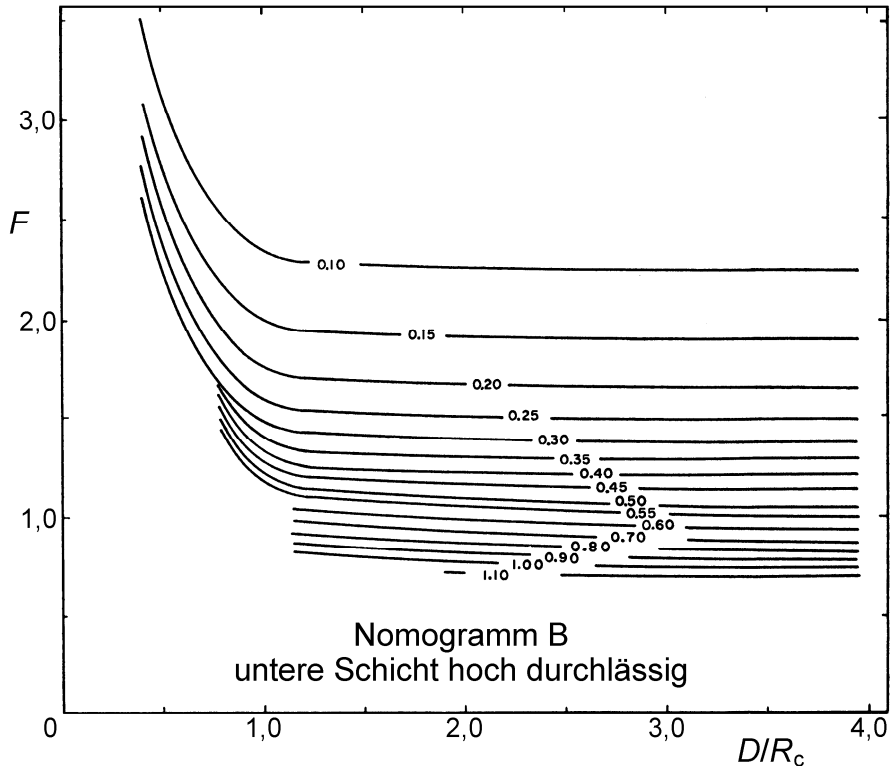


Abbildung: Nomogramm B für die Bestimmung des *F*-Faktors (untere Schicht hoch durchlässig) (BOERSMA, 1965)

Versuchsprotokoll der Standard-Guelph-Permeameter-Messung

Bezeichnung:		Gerät Nr.:	
Versuchsdatum:		Gerätespezifische Zellkonstanten siehe Ventilknopf! X / cm² =	
Durchführender:		Y / cm² =	
Bohrlochradius R / cm = 3,0			

		Messreihe 1	Messreihe 2
Kerbe am Ventilknopf			
X: beide Zylinder oben	Wassertiefe H / cm =	5,0	10,0
Y: nur Innenzylinder unten	A_{Res} = X oder Y:		
quasistationäre Absenkung	Δs / cm ± 0,1 =		
im Zeitintervall	Δt / s ± 1 =		
Absenkrate $q = \Delta s / \Delta t$	q / (cm/s) =		
Fluss $Q = q \cdot A_{Res}$	Q / (cm³/s) =		

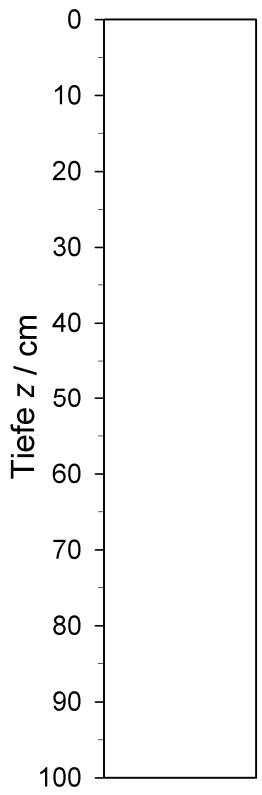
Messreihe 1				Messreihe 2			
Zeit		Absenkung		Zeit		Absenkung	
t hh:mm:ss	Δt / s ± 1	s / cm ± 0,1	Δs / cm ± 0,1	t hh:mm:ss	Δt / s ± 1	s / cm ± 0,1	Δs / cm ± 0,1

$$\frac{k_{fs}}{cm \cdot s^{-1}} = 0{,}0041 \cdot \frac{Q_2}{cm^3 \cdot s^{-1}} - 0{,}0054 \cdot \frac{Q_1}{cm^3 \cdot s^{-1}}$$

$$\frac{\phi_m}{cm^2 \cdot s} = 0{,}0572 \cdot \frac{Q_1}{cm^3 \cdot s^{-1}} - 0{,}0237 \cdot \frac{Q_2}{cm^3 \cdot s^{-1}}$$

$k_{fs}/(cm \cdot s^{-1})$ = 0,0041×_____ − 0,0054×_____ =	$\alpha^* = k_{fs} / \phi_m$ =
$\phi_m / (cm^2 \cdot s)$ = 0,0572×_____ − 0,0237×_____ =	$h_f = 1 / \alpha^*$ =

Situationsbeschreibung

Lageplan:	Bodenprofil:
	

Anmerkungen:

Auswertung der Guelph-Permeameter-Messung

Bezeichnung:		Gerät Nr.:	
Versuchsdatum:		Gerätespezifische Zellkonstanten siehe Ventilknopf! X / cm² =	
Durchführender:		Y / cm² =	
Kurve 1, 2 oder 3:		Bohrlochradius: Standard R / cm =	3,0
Kurve 1 – $\alpha^* \geq 0{,}09$ cm^{-1} (Standard)		R / cm ± 0,1 =	
Kurve 2 – $\alpha^* = 0{,}04$ cm^{-1} (Kurven-Nr.			
Kurve 3 – $\alpha^* = 0{,}01$ cm^{-1} siehe Rückseite)			

		Messreihe 1	Messreihe 2
Wassertiefe im Bohrloch	Standard: H / cm =	5,0	10,0
Zellkonstante: Kerbe am Ventilknopf X: beide Zylinder oben Y: nur Innenzylinder unten	H / cm ± 0,1 =		
	$A_{Res} = X$ oder Y:		
quasistationäre Absenkung	Δs / cm ± 0,1 =		
im Zeitintervall	Δt / s ± 1 =		

geometrisches Verhältnis H/R	Standard: H/R =	1,67	3,33
	H/R =		
Absenkrate $q = \Delta s / \Delta t$	q / (cm/s) =		
Fluss $Q = q \cdot A_{Res}$	Q / (cm³/s) =		
Formfaktor $C = f(H/R, \text{Soil Type})$	C =		

$$G_2 = \frac{H_1 \cdot C_2}{\pi \cdot (2 H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))}$$

$$G_1 = G_2 \cdot \frac{H_2 \cdot C_1}{H_1 \cdot C_2}$$

$$J_1 = \frac{(2 H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1}{2 \pi \cdot (2 H_1 \cdot H_2 \cdot (H_2 - H_1) + R^2 \cdot (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))}$$

$$J_2 = J_1 \cdot \frac{(2 H_1^2 + R^2 \cdot C_1) \cdot C_2}{(2 H_2^2 + R^2 \cdot C_2) \cdot C_1}$$

Koeffizienten	G_2 =		Koeffizienten	G_1 =	
	J_1 =			J_2 =	

beide Messreihen gemeinsam

$$k_{fs} = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1$$

$$\phi_m = J_1 \cdot Q_1 - J_2 \cdot Q_2$$

feldgesättigte Durchlässigkeit	k_{fs} / (cm/s) =	
Matrixfluss-potenzial	ϕ_m / (cm²/s) =	
mak. Kapillarlängenparameter	α^* / cm^{-1} =	
Wasserspannungshöhe	h_f / cm =	

$$\alpha^* = k_{fs} / \phi_m$$

$$h_f = 1 / \alpha^* = \phi_m / k_{fs}$$

beide Messreihen getrennt

	Mittel	Messreihe 1	Messreihe 2
feldgesättigte Durchlässigkeit			
Matrixfluss-potenzial			
mak. Kapillarlängenparameter		α^* festgelegt	
Wasserspannungshöhe			

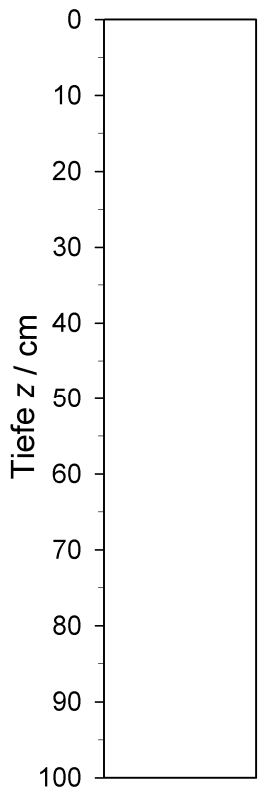
$$k_{fs} = \frac{C \cdot Q}{2 \pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C + 2 \pi \cdot H / \alpha^*}$$

$$\phi_m = \frac{C \cdot Q}{(2 \pi \cdot H^2 + \pi \cdot R^2 \cdot C) \cdot \alpha^* + 2 \pi \cdot H}$$

Situationsbeschreibung

Lageplan:

Bodenprofil:



Bodentextur/struktur-Kategorien und zuzuordnender Kapillarlängenparameter α^* [Reynolds, Elrick und Youngs, 2002a]

Bodentextur- und -struktur-Kategorie	α^* / cm^{-1}	Kurve Nr.
Verdichtete, strukturlose, tonige oder schluffige Substrate. Diese Kategorie trifft oftmals auf Deponieabdeck- oder –dichtungsschichten, limnische oder marine Sedimente zu	0,01	3
Böden, die sowohl fein texturiert (tonig oder schluffig) als auch unstrukturiert sind; können auch einen gewissen Feinsand-Anteil aufweisen	0,04	2
Die meisten strukturierten Böden von Tonen bis zu Lehmen, einschließlich unstrukturierten mittleren und feinen Sanden. Diese Kategorie trifft für die meisten landwirtschaftlich genutzten Böden zu	0,12	1
Grobsande und kiesige Sande; einschließlich stark strukturierte oder aggregierte Böden als auch Böden mit großen und/oder zahlreichen Rissen oder Makroporen	0,36	1

Anmerkungen: